

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

**КУЗЬМИЧЄВ АНАТОЛІЙ ІВАНОВИЧ**

УДК 537.523: 537.525: 537.533: 537.534: 621.387

**ГАЗОРОЗРЯДНІ СИСТЕМИ З ВТОРИННИМИ ЕМІТЕРАМИ ДЛЯ  
ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ**

05.27.02 – вакуумна, плазмова та квантова електроніка

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертація є рукопис.


Робота виконана на кафедрі електронних приладів та пристроїв в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України

<b>Науковий консультант:</b>	доктор технічних наук, професор <b>Денбновецький Станіслав Володимирович</b> , Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, професор кафедри електронних приладів та пристроїв
<b>Офіційні опоненти:</b>	доктор технічних наук, професор <b>Юферов Володимир Борисович</b> , Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, завідувач відділу Інституту плазмової електроніки і нових методів прискорення  доктор технічних, професор <b>Сидорець Володимир Миколайович</b> , Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Провідний науковий співробітник відділу фізики газового розряду та техніки плазми  доктор фіз.-мат. наук, професор <b>Гончаров Олексій Антонович</b> , Інститут фізики НАН України, головний науковий співробітник відділу газової електроніки

Захист відбудеться 19 червня **2018 р. о 14 годині 30 хв.** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.08 в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корпус 12, аудиторія 412-12.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 18 травня 2018 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08, к.т.н, доцент		В. Г. Артюхов
---	---	---------------

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток багатьох напрямів у науці і техніці пов'язаний із дослідженням, вдосконаленням і використанням газорозрядних систем, на основі яких створюються високоефективні комутуючі прилади (розрядники), плазмові дисплеї, лазери і потужні джерела некогерентного світла, електронні, іонні та плазмові джерела і технологічні пристрої, генератори електричної і механічної енергії, біомедична апаратура і установки екологічного призначення. Особливе значення мають газорозрядні системи з вторинними емітерами (ГрСВЕ), які в електроніці функціонально доповнюють електровакуумні прилади та пристрої з вторинними емітерами електронів та електронні системи в цілому.

У ГрСВЕ вторинний емітер є джерелом вільних частинок, що виникає та функціонує завдяки процесам у самій системі. В окремих системах одночасно функціонує декілька вторинних емітерів. Роль вторинного емітера може виконувати поверхня твердого тіла, або розплаву металу, або плазмового утворення. Він може емітувати не тільки заряджені, але й нейтральні частинки (атоми, молекули, нейтрони), а також фотони в різних ділянках електромагнітного спектра. Вторинний емітер забезпечує внутрішній зворотний зв'язок в ГрСВЕ і може переходити з одного режиму в інший при змінюванні зовнішніх або внутрішніх умов.

Вторинний емітер позбавлений більшості відомих недоліків термодіодного катода і рідкого ртутного катода: він може працювати в будь-якому положенні, не боїться бомбардування високоенергетичними частинками, а в багатьох випадках – і хімічного впливу. Він може допускати нагрівання і навіть розплавлення в деяких системах. Вторинний емітер може бути переведений з режиму тліючого розряду в режим катода вакуумної дуги і в цьому випадку він забезпечує генерацію плазми з попередньої твердої речовини катода і комутацію надзвичайно великих струмів; а потім відновлює свої властивості.

Вторинний електронний емітер може одночасно бути джерелом речовини, яка випаровується або розпилюється з його поверхні, що знаходить застосування в технології нанесення покриттів, генерації високоенергетичних потоків і плазми частинок твердих речовин. ГрСВЕ застосовуються в технології охорони навколишнього середовища, ядерній та космічній техніці. Якщо оцінювати з практичної точки зору потенційні можливості ГрСВЕ, то вони дозволяють вирішити багато задач плазмової електроніки. Перспективність вивчення і практичного застосування розрядів і систем з вторинними емітерами була доведена вченими та інженерами України, ближнього і далекого зарубіжжя, а постійний інтерес до них викликаний тим, що вони знаходять з кожним роком нові галузі застосування.

Таким чином, актуальність теми дослідження і розробки газорозрядних систем на основі вторинних емітерів частинок обумовлена широкими, ще невикористаними можливостями і перспективами застосування цих систем в сучасній електронній апаратурі, зокрема, для:

- електричної комутації та генерації імпульсів високої напруги і великих струмів,
- генерації потоків/пучків заряджених і нейтральних атомних частинок і нейтронів, електромагнітного та лазерного випромінювання,
- електронної, іонної і плазмової технології конструювання поверхневих структур,

- генерації нерівноважної плазми атмосферного тиску для нетермічних технологічних процесів, біомедицини та екології.

Актуальність теми також обумовлена відсутністю повної ясності в деталях фізичних процесів, що мають місце в обговорюваних системах, і потребою доопрацювання теорії газових розрядів з вторинними емітерами, оскільки вони існують в практично необмеженому і до кінця не вивченому різноманіттю форм і параметрів, а суміжні науки дають нові відомості про процеси, які відіграють важливу роль в цих розрядах. До таких процесів відноситься взаємодія високоенергетичних частинок з газом і електродами, процеси в газорозрядній плазмі, хімічні та біологічні ефекти. Актуальна також розробка та апробація прикладних комп'ютерних програм для прогнозування параметрів, розрахунку, аналізування та проектування даних систем при достатній повноті врахування елементарних процесів на принципах фізичної кінетики.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, що пов'язана з систематичним і комплексним дослідженням і моделюванням газорозрядних систем з вторинними емітерами та спрямована на розробку електронної апаратури, зокрема, комутуючих приладів, технологічних пристроїв і біомедичної апаратури, є актуальною і присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми розробки наукових і технічних основ побудови ГрСВЕ для комутуючої, технологічної та біомедичної апаратури з поліпшеними показниками.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводилися на кафедрі електронних приладів та пристроїв (ЕПтаПр) КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема в рамках фундаментальних і прикладних бюджетних і госпдоговірних робіт, що виконувалися за програмами, планами і темами наукових досліджень, які відповідають закону України “Про пріоритетні напрями розвитку науки та техніки” (ст. 3, п.1), “Основним науковим напрямом та найважливішим проблемам фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук” (постанова Президії НАНУ № 179, 20.12.2013, пп. 1.4.8, 1.6.3) і цільової програми наукових досліджень НАНУ “Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій” (п. 4. “Низькотемпературна плазма і технології на її основі”), а також виконувалися:

- на підставі Угоди між Урядом України і Урядом Республіки Білорусь про науково-технічне співробітництво від 17.02.1992 р., протоколу Міжурядової Білорусько-Української комісії з співробітництва в галузі науки і технології від 19-20.06.2003 р. та наказу МОН України № 600 “Про фінансування українсько-білоруських проектів в 2003 році”: теми “Розробка потужних імпульсних систем розпилення матеріалів на основі магнетронних і дугових систем і прив'язка їх до технологічних процесів з метою одержання нових тонко- і товстошарових покриттів” (ДР № 0103U002207) і “Розробка імпульсних систем і отримання товстошарових покриттів” (ДР № 0103U002208);
- відповідно до Комплексно-цільової програми “Електроніка” за постановою Президії АН України № 537 від 05.12.84 р.; Республіканським планом найважливіших НДР АН України і координаційним планом на 1985-90 рр., наказами міністра електронної промисловості СРСР № 234 від 24.08.88 р і № 39 від 1.09.89 р.: теми “Розробка і дослідження пристроїв іонного осадження і обробки тонких плівок з високочастотним живленням та їх впровадження” (ДР № 01850076800) і “Розробка, дослідження та впровадження пристроїв для осадження плівок з імпульсною іонною обробкою” (ДР № 01870094631);

- відповідно до координаційного плану НДР з фізики плазми на 1986-1990 рр. Мінвузу СРСР (наказ № 557 від 28.07.86.) – завдання 5.1: “Розробка математичних моделей для опису фізичних процесів в газонаповнених високовольтних проміжках, побудова ефективних чисельних методів і алгоритмів розрахунку газорозрядних систем”;

- відповідно до планів держбюджетних робіт, що виконувалися на кафедрі ЕПтаПр у період 1993-2017 рр.: теми “Розробка імпульсного модулятора для установки іонного осадження покриття (ДР № 0193U032451); “Розробка переносного малогабаритного стабілізованого генератора озону підвищеної концентрації для озонотерапевтичної установки” (ДР № 0194U016710); “Розробка та дослідження імпульсного іонно-плазмового методу отримання тонких плівок та покриттів складного вмісту” (ДР № 0195U002865); “Дослідження високовольтних розрядів та створення на їх основі медико-технологічної апаратури” (ДР № 0196U000419); “Дослідження ефективних методів синтезу озону і розробка апаратури для його використання в медицині, біології та техніці” (ДР № 0196U000432); “Дослідження та розробка ефективних озонаторів з тонкоплівковим діелектричним бар’єром і газорозрядних пристроїв та технології для їх виготовлення” (ДР № 0198U001233); “Дослідження дії озону на біомедичні об’єкти і розробка методів та пристроїв для його контролю” (ДР № 0198U001251); “Створення і дослідження структурно-функціональних, алгоритмічних та параметричних моделей озонотерапевтичних процедур і розробка на цій основі принципів побудови озонотерапевтичної апаратури нового покоління” (ДР № 0100U000713); “Моделювання та дослідження вакуумно-плазмових та електронно-променевих процесів отримання електродних матеріалів для роботи в агресивних середовищах та сильних електричних полях” (ДР № 0100U000728); “Моделювання та дослідження розрядів низького тиску з вторинними емітерами для генерації та керування потужними електронними потоками” (ДР № 0102U000812); “Дослідження та моделювання високовольтного тліючого та вакуумно-дугового розрядів для застосування в термоіонних технологіях осадження покриттів” (ДР № 0104U003028); “Дослідження розрядів низького тиску для застосування в технологіях електронно-променевого осадження покриттів із бінарних сполук” (ДР № 0106U002151); “Дослідження технології нанесення сполук на великі поверхні газорозрядним випарником при пролітно-дифузійному перенесенні пари” (ДР № 0108U000499); “Дослідження розрядів низького тиску для розробки обладнання та технології імпульсного електронно-променевого випаровування та іонно-плазмового осадження наноструктурованих покриттів (ДР № 0110U002292); “Розробка та дослідження газорозрядного обладнання для імпульсного електронно-променевого випаровування та іонно-плазмового осадження наноструктурованих покриттів (ДР № 0112U000894); “Дослідження фізичних, технологічних та інформаційних засад створення електронних приладів, пристроїв та систем” (ДР № 0112U005032); “Дослідження високовольтного газового розряду для нанесення теплозахисних покриттів імпульсним електронно-променевим випаровуванням” (ДР № 0114U000577); “Фізико-топологічне математичне моделювання джерел заряджених та нейтральних частинок” (ДР № 0115U006750). У вказаних роботах здобувач був науковим керівником або провідним виконавцем.

**Мета і завдання досліджень.** *Мета роботи* – дослідження з використанням фізико-математичного та експериментального моделювання шляхів побудови ГрСВЕ з новими можливостями і поліпшеними характеристиками для застосування в перспективній електронній апаратурі.

*Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:*

- провести аналіз фізичних явищ в ГрСВЕ і уточнити фізичну модель систем низького тиску для режиму сильного поля,

- створити на принципах фізичної кінетики математичні фізико-топологічні моделі типових систем з різними типами вторинних емітерів для стаціонарного та імпульсного режимів роботи, виконати розрахунки і порівняти результати з експериментом для валідації створених моделей,
- розробити та дослідити прототипи газорозрядного комутатора магнетронного типу з холодним вторинно-емісійним катодом для переривання струму при високій напрузі,
- розробити та дослідити імпульсні системи з вторинними емітерами для електронно-іонної і плазмової технології конструювання поверхневих структур,
- дослідити розряд атмосферного тиску, в якому використовується вторинно-емісійний катод, і можливості його застосування в біомедичній озонній апаратурі; створити озонотерапевтичний апарат.

**Об'єкт досліджень:** газорозрядні системи з вторинними емітерами для високовольтної комутації струму, імпульсної іонно-плазмової технології конструювання поверхневих структур і генерації озону для біомедичних технологій.

**Предметом досліджень є:**

- механізм дії взаємопов'язаних елементарних процесів в умовах сильного поля, який формалізований за допомогою системи кінетичних рівнянь; роль і взаємозв'язок окремих процесів та їх вплив на зовнішні характеристики ГрСВЕ,
- характеристики високовольтного газорозрядного комутатора-переривника струму магнетронного типу і шляхи поліпшення його параметрів,
- шляхи побудови і характеристики імпульсних систем з вторинними емітерами частинок для іонної і плазмової технології конструювання поверхневих структур,
- характеристики систем на основі розрядів атмосферного тиску з вторинно-емісійним катодом і можливості їх застосування в біомедичній озонній апаратурі.

**Методи наукових досліджень включають:**

- бібліографічний аналіз науково-технічної і патентної літератури, а також інформаційних матеріалів в базах даних та в Інтернеті;
- методи математичної фізики, фізичної кінетики, комп'ютерних обчислень, включаючи розрахунки за методом Монте-Карло для процесів руху частинок в тілі вторинного емітера і газовому середовищі навколо емітера, методи статистичної обробки результатів вимірювань, визначення похибки вимірювань і ступеня відповідності розрахункових і експериментальних даних;
- електричні вимірювання, включаючи імпульсні і ВЧ вимірювання, осцилографія, осцилографія з пам'яттю і масштабно-часовими перетвореннями, спектральні вимірювання для процесів в електричних схемах/колах і газі;
- вимірювання параметрів вакуумних технологічних процесів, температури підкладок з високим потенціалом, станів газових середовищ, концентрації озону;
- методи матеріалознавчих/металографічних досліджень, оптична і електронна мікроскопія, мікрозондовий аналіз, вимірювання механічних властивостей поверхні, товщини і оптичних властивостей покриттів;
- методи біомедичних досліджень для озонотерапії і бактерицидного ефекту.

Теоретичні положення та висновки підтверджені результатами експериментальних досліджень з похибкою вимірювань, яка не перевищує 20 %, а в більшості випадків похибка комп'ютерного моделювання біля 10 %.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В дисертації отримані такі нові наукові результати:

1. Вперше удосконалено теоретичну модель ГрСВЕ для режиму сильного поля при низьких тисках (в діапазоні параметрів, характерних для лівої гілки кривої Пашена) шляхом урахування іонізації газу відбитими від катода швидкими нейтральними атомними частинками додатково до відомих механізмів іонізації електронами, іонами та нейтралами перезарядки, а також електронами, відбитими від анода, що поліпшило узгодження розрахункових теоретичних результатів з експериментом. Показано, що внесок нового процесу в іонізацію газу може досягати десятків відсотків.

2. Вперше, на принципах фізичної кінетики створено та підтверджено результатами експерименту комплекс удосконалених фізико-топологічних моделей типових газорозрядних систем з вторинними емітерами та рухом частинок в режимі сильного поля; моделі враховують різноманітність елементарних фізичних процесів у газі та на поверхні електродів, включаючи відбивання (зворотне розсіювання) від них високоенергетичних частинок. Отримано нові дані про високовольтні розряди низького тиску, які показують істотну роль атомних частинок, відбитих від катода, в іонізації газу низького тиску. Побудовані моделі дозволяють розраховувати функції розподілу частинок та вторинну емісію електродів, включаючи емісію та масоперенос розпиленої речовини через газ, прогнозувати параметри та характеристики проєктованих газорозрядних систем, приладів та пристроїв різноманітного призначення. Застосування моделей дозволяє підвищити точність автоматизованого проєктування ГрСВЕ.

3. Вперше, за результатами теоретичного аналізу та експериментального дослідження характеристик газорозрядного комутатора-переривника струму на тліючому розряді магнетронного типу з надщільною вторинною електронною емісією холодного катода для потужних імпульсних модуляторів запропоновані і апробовані нові способи поліпшення параметрів комутатора і зменшення потужності магнітного керування шляхом амплітудної і пакетно-імпульсної модуляції керуючого імпульсного магнітного поля, ступінчастого подавання напруги на комутатор під час його вмикання, профілювання електродів за діаметром та секціонування міжелектродного проміжку.

4. Запропоновано і реалізовано удосконалення систем для осадження тонких плівок і покриттів з іонно-плазмовою активацією шляхом введення в системи вторинних твердотільних і плазмових емітерів нейтральних і заряджених частинок осаджувальної речовини з імпульсним електричним живленням, що дозволяє якісно та оперативно керувати вмістом і мікроструктурою тонких плівок та покриттів і регулювати температурний режим мішеней і підкладок. Імпульсна модуляція також забезпечує стійкість процесів осадження до електричних пробів та дугоутворення на підкладах і мішенях, які розпилюються.

5. Запропоновані і перевірені нові принципи роботи і схеми імпульсних модуляторів для систем термоіонного та магнетронного осадження тонких плівок і покриттів з поліпшеними характеристиками. Запропонований перехід від імпульсної модуляції з рівномірним розподілом імпульсів за часом до пакетно-імпульсної модуляції плазмоутворюючого розряду в системах фізичного осадження покриттів з

іонізацією паро-газового середовища збільшив в декілька разів концентрацію іонів у плазмовому середовищі та струм емісії іонів з нього на підкладку при збереженні середньої потужності розряду, що підвищило енергетичну ефективність систем.

6. Вперше, для прискорення іонів в системах термоіонного осадження покриттів і плазмової іонної імплантації запропоновано і вивчено подавання на підкладки негативної імпульсної напруги через електронний вакуумний прилад-комутатор з керуванням за допомогою сітки з позитивним потенціалом в режимі часткового повернення електронів від головного анода та їх перехоплення сіткою, як другим анодом. Це забезпечує слабку залежність прискорювальної напруги від струму іонної емісії плазми при автоматичному обмеженні максимального струму на підкладку заданою величиною, а відтак запобігає дугоутворенню на підкладці. Величина максимального струму підкладки визначається максимально дозволеним струмом електронного комутатора, який задається параметрами електричного режиму сітки. Застосування комутатора вакуумного типу забезпечує електричну ізоляцію та захист керуючого кола від перенапруг та електричних пробів, що підвищило надійність роботи обладнання.

7. Запропоновано і підтверджено осадження шарів градієнтного оптичного метаматеріалу з заданим профілем розподілу коефіцієнта заломлення шляхом одночасної вторинної емісії атомів різних металів з двох рознесених мішеней, які розпилюються за рахунок іонного бомбардування при подаванні на них імпульсної напруги. Керування профілем розподілу коефіцієнта заломлення здійснюється шляхом переміщення підкладок над емітерами розпилених атомних частинок за заданою програмою, а плазмова активація реакційного газового середовища в області розташування підкладок дозволяє отримати необхідний хімічний склад якісного оптичного метаматеріалу.

8. Показано, що концентрація озону  $C$  на виході озонатора з безстримерним мульти-коронним розрядом атмосферного тиску з вторинно-емісійним катодом залежить від загального струму розряду  $I$  і потоку газу  $Q$ , при цьому конфігурація електродної системи коронного розряду впливає на концентрацію озону не більше ніж на 30 %. Для апарату АК-4М з біполярним мульти-коронним розрядом проміж голковими електродами при потоці кисню в діапазоні 1-10 л/хв (швидкості потоку 0,6-6,0 см/с) і розрядному струмі до декількох міліампер без примусового охолодження озонатора величина  $C$  [мг/м<sup>3</sup>] =  $1,15 \times I$  [мкА]  $\times Q^{-0,7314}$  [л/хв], при цьому досягається короткочасна (до 8 годин) і довгострокова (до 1000 годин) стабільність генерації озону у режимі стабілізації струму, що забезпечує застосування даного озонатора в біомедицині з позитивним ефектом.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розвинені кінетичні моделі високовольтних розрядів низького тиску з вторинно-емісійними електродами, результати розрахунків за якими дозволяють передбачати параметри та характеристики ГрСВЕ і апаратури на основі таких розрядів. Запропоновано і реалізовано адекватну методику розрахунків на основі кінетичного підходу:

- енергетичних характеристик потоків частинок, які бомбардують електроди високовольтних газорозрядних приладів та систем у передпробійному режимі і електричної міцності комутуючих приладів низького тиску;



- параметрів потоку частинок, які бомбардують електроди або підкладки під негативним потенціалом в плазмі газового розряду у ГрСВЕ технологічного призначення;

- масопереносу розпиленого матеріалу і профілю товщини плівки на підкладці в пристроях іонного розпилення.

2. Був розроблений та успішно випробуваний в експериментальному промисловому виробництві високовольтний газорозрядний комутатор-переривник струму на тліючому розряді магнетронного типу з надщільною вторинною електронною емісією катода для потужних імпульсних модуляторів з ємнісним та індуктивним накопичувачами енергії В конструкції приладу реалізовані результати досліджень нових способів поліпшення параметрів і характеристик газорозрядних комутаторів-переривників струму з магнітним керуванням.

3. Створені та використовуються у виробництві покриттів та тонких плівок нові імпульсні системи з вторинними емітерами та іонно-плазмовою активацією, які забезпечують підвищення якості характеристик покриттів і плівок, а також стійкості процесів осадження до електричних пробів та дугоутворення на підкладках і мішенях, що розпилюються, за рахунок використання та оптимізації імпульсних режимів. Отримані покриття з періодичною мульти-наношаровою та градієнтною мікроструктурою для оптики та машинобудування. Апробована дослідна технологія імпульсного реакційного термоіонного осадження і магнетронного розпилення для нанесення металевих покриттів з розвинутою мікроструктурою на анодну фольгу низьковольтних електролітичних конденсаторів з підвищеною питомою ємністю.

4. Запропоновані та практично реалізовані нові схеми імпульсних модуляторів для систем термоіонного та магнетронного осадження тонких плівок та покриттів, які використовуються в технологічних процесах ряду промислових та науково-дослідних установ. Запропоновано застосовувати імпульсний режим з пакетно-імпульсним подаванням імпульсів на іонізуючі пристрої та підкладки. Реалізовано спосіб підвищення ефективності іонізації металевої пари в системі термоіонного осадження тонких плівок шляхом переходу до пакетно-імпульсного режиму збудження індукційного розряду.

5. Реалізовано і впроваджено новий метод імпульсної іонізації металевої пари із застосуванням коливального контура з ударним збудженням, який спрощує конструкцію і налаштування технологічної установки (НДІ мікроприладів, м. Київ). Розробка використовується в технології складальних операцій при виробництві інтегральних схем (ІС) для металізації кремнієвих пластин і гнучких поліімідних носіїв для безкорпусного складання ІС. Впровадження розробки забезпечило підвищення виходу придатних виробів.

6. Створений оригінальний імпульсний транзисторний модулятор для електричного живлення магнетронного розпилювача у складі установки Leybold Z 550М за технічним завданням Інституту фізики академії наук Чеської республіки (м. Прага); модулятор використовується для дослідження імпульсного розпилення і осадження тонких плівок, зокрема плівок з вуглецем, з підвищеною густиною розрядного струму.

7. Результати дисертаційної роботи у вигляді наукових пропозицій, теоретичних розрахунків, конструкторських та технологічних розробок іонно-

плазмових випарних і розпилювальних систем з вторинними емітерами використані в Дослідницькому центрі “Pratt & Whitney–Paton” (м. Київ) при виконанні НДР та ДКР, орієнтованих на розробку та освоєння імпульсної іонно-плазмової технології нанесення металевих і керамічних покриттів на лопатки газотурбінних двигунів. Розроблені технологічні процеси підвищили стабільність функціонування високопродуктивного технологічного обладнання у розширеному діапазоні операційних параметрів, а також якість покриттів. При цьому для подавання на підкладки негативної імпульсної напруги застосований електронний вакуумний комутатор в режимі часткового повернення електронів від головного анода та їх перехоплення сіткою з позитивним потенціалом, як другим анодом.

8. На базі озонатора з безстрімерним мульти-коронним розрядом атмосферного тиску з вторинно-емісійним катодом створено озонотерапевтичний апарат “Активатор кисню АК-4М” розширеного спектра застосування. Медичне товариство України ознайомлене з апаратом і результатами його застосування медичними співвиконавцями розробки. Отримано дані, які вказують на перспективність використання розрядів атмосферного тиску з вторинно-емісійним катодом в біомедичній апаратурі, зокрема для озонотерапії і низькотемпературної стерилізації.

9. Результати роботи впроваджені в навчальний процес кафедри електронних приладів та пристроїв КПІ ім. Ігоря Сікорського при читанні лекцій та в лабораторні практикуми курсів “Технологічні основи електроніки,” “Технологія виробництва електронної техніки,” “Плазмова та імпульсна електроніка,” “Електронно-фотонні методи в екології,” “Електронні системи.” На базі отриманих результатів сформульовані напрямки нових досліджень для аспірантів (PhD студентів) кафедри.

10. Нові конструкторські і технологічні пропозиції захищені патентами і патентними заявками України, США, Європи та інших країн.

Використання результатів роботи підтверджене актами і листами-довідками відповідних організацій і підприємств.

Отримані результати можуть бути використані для розвитку електронної та машинобудівної промисловості України.

**Особистий внесок здобувача.** Внесок автора в проведення досліджень і одержання результатів, що наведені в дисертації, та їх впровадження є визначальним. Основні теоретичні положення і практичні результати дисертації розроблені і отримані автором самостійно та на протязі наукового керівництва дисертаційними роботами аспірантів (Цибульського Л.Ю., Чаплинського Р.Ю.) і очолюваного ним наукового колективу. З робіт, опублікованих зі співавторами, у дисертації використані матеріали, отримані автором особисто, або в яких автор брав безпосередню участь на етапі постановки задач, розробки методів дослідження, виконання експериментальних досліджень, проведення розрахунків, інтерпретації отриманих результатів, їх аналізу та узагальнення. Зокрема (згідно списку вибраних публікацій, який наведений нижче), у роботах із співавторами [1, 2, 3, 5, 6, 15, 39, 49, 50, 76, 77] оглядово-аналітичного характеру здобувач прийняв участь в збиранні, систематизації, аналізуванні і узагальненні інформації за характеристиками і використанню ГрСВЕ, формулюванні висновків. У публікаціях [4, 17-21, 26-30, 43-46, 51, 67, 68, 71, 74] представлені теоретичний базис і комплекс удосконалених кінетичних фізико-топологічних моделей для ГрСВЕ, де здобувач запропонував враховувати іонізацію

газу відбитими від катода нейтральними атомами додатково до багатьох інших фізичних процесів в газі та на поверхні електродів, створив систему апроксимацій для характеристик елементарних процесів, брав участь в створенні моделей, розрахунках та аналізі результатів моделювання, порівнюванні їх з експериментом, підготовці публікацій. У роботах [1, 68, 73] здобувач виконав розрахунки відбиття швидких атомів від катода. У роботах [7, 37, 47, 69] ним створено кінетичні моделі ГрСВЕ розпиленних частинок, виконано розрахунки масо- і енергопереносу з мішеней і визначено умови одержання покриттів потрібного профілю, підготовлено публікації. В роботах [2, 13, 14, 16, 48, 50, 63, 64, 72] розглянуто моделі систем і процесів для одержання багатошарових покриттів і градієнтних оптичних покриттів та фотонних метаматеріалів, в розробці і дослідженні яких здобувач брав безпосередню участь. У роботах [1, 4, 8, 31, 32, 35, 36, 41, 66] здобувач запропонував способи керування і конструкції електродів для поліпшення параметрів комутаторів з вторинно-емісійним катодом, у тому числі з порожнистим і плазмовим катодом, розрахував передпробійний режим, прийняв участь в експериментальних дослідженнях, аналізуванні результатів, підготовці публікацій. У роботах [2, 3, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 22, 23, 25, 33, 34, 38, 39, 40, 48, 62, 63, 64, 65, 72, 77] здобувачем запропоновано і досліджено використання для термоіонного та магнетронного осадження тонких плівок і покриттів імпульсних систем з вторинними плазмовими і твердими емітерами; при цьому поряд з рівномірною імпульсною модуляцією рекомендовано пакетно-імпульсну модуляцію плазмоутворюючого розряду і напруги для прискорювання іонів до підкладки; також запропоновано, реалізовано і досліджено нові схеми імпульсних модуляторів. У роботах [38, 62] здобувач запропонував і дослідив використання систем з вторинними плазмовим і твердим емітерами для нанесення металевих і керамічних покриттів на лопатки газотурбінних двигунів. У роботах [24, 42] досліджено та проаналізовано газорозрядні системи з вторинними емітерами електронів атмосферного тиску для генерації озону. У роботі [70] здобувач брав безпосередню участь в розробці і виготовленні газорозрядної біомедичної апаратури і виконанні досліджень, зокрема в області низькотемпературної стерилізації та озонотерапії, аналізуванні отриманих результатів і підготовці публікацій. Здобувачем запропоновано і обґрунтовано ідеї винаходів [52-61], прийнято участь в їх експериментальній апробації, підготовці заявок та обґрунтуванні формул винаходів

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на конгресах, конференціях, симпозіумах і семінарах: Int. Conf.-School on Plasma Physics & Controll. Fusion (2016 – Kharkov); Int. Conf. on Plasma Surf. Eng. – PSE (2004, 2012, 2014, Garmisch-Partenkirchen, Germany); Central Eur. Symp. on Plasma Chem. (2009 – Kyiv); Int. Symp. on High Pressure Low Temp. Plasma Chem.– HAKONE (Germany: 2000 – Greifswald, 2014 – Zinnowitz); Int. Workshop on Plasma-Based Ion Implantation & Deposition (2013 – Poitiers, France); Int. Cong. on Metamaterials – Adv. Electromag. Mater. in Microwaves and Optics (2011 – Barcelona, Spain); Int. Young Scientist Workshop on Optics, Photonics and Metamaterials – OPAM – (2009 – Kharkov); Prog. in Electromag. Res. Symp. – PIERS (2012 – Moscow; 2013 – Stockholm; 2015 – Prague.); Int. Cong. on Plasma Phys. (1998 – Prague); Int. Conf. on Phenom. in Ionized Gases – ICPiG (1999 – Warsaw; 2003 – Greifswald); Eur. Conf. on Atom. & Mol. Phys. of Ionized Gases – ESCAMPIG (2004 – Constanta; 2010 – Novi Sad, Serbia); Int. Conf on Gas Disch. & Their Appl. (1997 – Greifswald); Int. Symp. on Disch. and Electrical Insulation in Vacuum – ISDEIV (1998 – Eindhoven, The Netherlands; 2002 – Tours, France); Int. Symp. on Plasma Chem. (1999 – Prague; 2001 – Orleans); Int. Conf. “Plasma Phys. & Plasma Technol.” (1997, 2000 – Minsk); Int. Conf. on Mod. of Mat. with Particle Beams & Plasma Flows (2000,

2006 – Tomsk); Int. Conf. “Ion Implantation & Other Appl. of Ions and Electrons – ION” (2004, 2006 – Kazimierz Dolny, Poland); Eur. Workshop on Pulsed Plasma Surf. Technol. (2002 – Dresden); Int. Conf. on Electron Beam Technol. (2009 – Varna, Bulgaria); Int. Sci. Conf. ELNANO – Electronics & Nanotechnol. (2012 – Kyiv); Конф. по физике газовых разрядов (1994 – Самара; 1996, 1998, 2000, 2002 – Рязань); Междунар. Крейнделевский сем. по плазм. эмисс. электронике (1991, 2009 – Улан-Удэ); Междунар. н/т конф. “Плёнки и покрытия” (2009, 2011, 2013 – С.-Петербург); Междунар. н/т конф. “Быстрозакал. матер. и покрытия” (2010-2013 – Москва); Междунар. научн. конф. “Физико-хим. основы форм. и модиф. микро- и наноструктур” (2008 – Харьков); Междунар. н/т конф. “Вакуумная техн., матер. и технол.” (2008, 2010, 2013 – Москва); Н/т сем. “Электровакuumная техника и технология” (2002, 2008 – Москва); Междунар. н/т конф. “Вакуумная наука и техника” (2000-2013 – Крым и Сочи); Междунар. н/пр. симп. “Функциональные покрытия на стеклах” (2003 – Харьков); Междунар. конф. и симп. “Вакуумные технологии и оборуд.” (1998, 1999, 2001, 2006 – Харьков); Харьковская Нанотехнологическая Ассамблея (2002, 2008 – Харьков); Междунар. симп. “Тонкие пленки в оптике и электронике” (1995 – Херсон; 1996 – Йошкар-Ола; 2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2012 – Москва); Всесоюзн. конф. “Созд. комплексов электротехн. оборуд. высоковольтной, преобраз., сильноточной и полупровод. техники” (1990 – Москва); Междунар. н/т конф. “Проблемы физической и биомедицинской электроники” (ежегодно 1995-2004 – Киев); Int. Ozone Symp. (1999 – Basel, Switzerland); Всеросс. научно-практ. конф. “Озон и методы эфферентной терапии в медицине” (1998 – Нижний Новгород); VI з’їзд дермато-венерологів України (1999 – Київ); Міжнар. н/пр. конф. “Місцеве та парентеральне використання озонотерапії в медицині” (2001 – Харків); Всеукр. н/пр. конф. “Современные аспекты применения озона в медицине, экологии и быту” (2005, 2007 – Крым, Украина) та інших.

### **Публікації.**

Основні положення дисертації опубліковано у 193 наукових працях, у тому числі 4 монографіях, 2 розділах в колективній монографії і енциклопедії; 69 статтях у наукових фахових виданнях, з них 3 статті у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз, 31 статей у іноземних виданнях, а також у 15 авторських свідоцтвах і патентах України та США; 89 матеріалах конференцій; 1 препринті, 3 брошурах для товариства “Знання” України, 10 статтях в інших виданнях.

**Структура і зміст роботи.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, викладених на 193 сторінках тексту, списку використаних джерел із 850 публікацій вітчизняної та зарубіжної літератури. Робота містить 105 ілюстрацій, 20 таблиць, 4 додатків із доповнювальними матеріалами та актами і довідками про використання результатів дисертації. Загальний обсяг роботи – 425 сторінки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані її мета і завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами викладена наукова новизна роботи, показана практична цінність отриманих результатів, наведено короткий зміст дисертації за розділами.

**1. Перший розділ** присвячений аналізуванню стану досліджень, моделювання і розробок ГрСВЕ для комутуючої, технологічної та біомедичної апаратури з метою вибору і обґрунтування підходів та методик до виконання дисертаційної роботи.

**1.1.** Перша частина розділу присвячена аналізу методів теоретичного дослідження і моделювання розрядів з вторинними емітерами і вибору моделі для ГрСВЕ на їх основі. Розглянуті розряди і системи з сильним полем [ $E/n \sim 30 \dots 300$  Тд,  $E/p \sim 10^2 \dots 10^7$  В/м·Па, де  $n$  – концентрація частинок газу ( $0^\circ\text{C}$ ), напруженість поля  $E \sim 3 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^6$  В/м, тиск  $p \sim 0,03 \dots 30$  Па]. При цьому проміжок між електродами  $d \sim 0,1 \dots 1$  см, напруга  $U \gg \phi_i$  ( $\phi_i$  – потенціал іонізації газу); середня довжина вільного пробігу для електронів  $\lambda_e > d$ , для іонів  $\lambda_i \sim d$ ; функції розподілу частинок “нерівноважні” і “нелокальні” по відношенню до локального значення  $E$ . В [4,46] нами наведено огляд моделей розрядів з сильним полем. Моделі систематизовані у двох напрямках: за методами математичного опису і розв’язання задач та за врахуванням елементарних процесів в газі і на електродах.

Перший напрямок включає гідродинамічні, кінетичні і гібридні моделі. Для побудови нелокальних моделей відомі підходи на базі кінетичних рівнянь Больцмана, методи Монте-Карло, “частинка в комірниці + Монте-Карло” (*PiC-MC*), “великих частинок”. Гібридні моделі поєднують кінетичний опис для швидких частинок з гідродинамічним для повільних частинок. Відомо, що у сильному полі кутове розсіювання швидких частинок при зіткненнях не суттєво, тобто їх рух –, і формуються анізотропні, моноенергетичні пучки електронів з енергією  $e\phi_a$ , де  $\phi_a$  – потенціал на границі зони прискорення. Вторинні електрони, утворені в точці  $x$ , також утворюють парціальний пучок з енергією  $e(\phi_a - \phi_x)$ , а між електродами встановлюється променева/пучкова форма розряду з нерівноважним енергетичним спектром електронів на границі зони прискорення (в аномальному тліючому розряді – на передній границі плазми негативного світіння) з величезним піком максимальної енергії  $e\phi_a$ . В сильному полі іони і нейтралі перезарядки також формують анізотропні пучки. Пучкові моделі поділяють на однопучкові з одним моноенергетичним пучком або багатопучкові з багатьма парціальними моноенергетичними пучками. Пучкові моделі за методом “великих частинок” є варіантом чисельного розв’язання кінетичних рівнянь Больцмана і нагадують пряме моделювання руху частинок методом Монте-Карло в наближенні “строого вперед”.

Моделі другого напрямку систематизації відрізняються за ступенем врахування елементарних процесів в газовому об’ємі і на поверхні електродів (в першу чергу вторинної електронної,  $\gamma$ -емісії, катода), нестаціонарності розряду і багатовимірності геометрії. Перші (початкові) моделі враховували іонізацію тільки електронами, але з розвитком високовольтової газової електроніки ( $U \gg 1$  кВ) створювалися моделі з іонізацією іонами і швидкими нейтралами перезарядки. Також врахують відбивання від анода високоенергетичних електронів, яке дуже важливо для розрядів низького тиску. Коефіцієнти відбиття електронів і їх енергії становлять десятки відсотків, а подовжені параболічні траєкторії цих електронів призводять до помітної іонізації газу в прианодній області і підвищенню  $\gamma$ -емісії.

Дослідження оптичних спектрів емісії з ГрСВЕ, аналіз потоків атомних частинок, відбитих від катодної поверхні, їх впливу на нагрів газу і поверхонь, розташованих навпроти катода, і на процес формування плівок в пристроях іонного розпилення, переконливо довели наявність в розрядах низького тиску потоків високоенергетичних нейтральних атомів, що рухаються від поверхні катода. Також

зазначалося, що в термоядерних плазмових установках відбиті від стінок камери атомні частинки відіграють істотну роль в балансі частинок та енергії плазми. Справді, коефіцієнт відбиття атомів може становити десятки відсотків, а їх енергія може досягати енергії частинок, що бомбардують катод. Це підтверджують розрахунки коефіцієнтів відбиття частинок і енергії, виконаних за допомогою відомої програми TRIM. Але роль відбитих від катода швидких атомних частинок, як фактора іонізації газу в електричних розрядах, у літературі не розглядалася. На цей ефект ми вперше вказали у нашій публікації в 1983 році [21].

В даній роботі будемо формувати теоретичний базис ГрСВЕ на основі фізико-топологічних моделей в режимі “сильного поля”. Був обраний метод “великих частинок”, як варіант методу *PiC-MC*, і багатопучкові моделі, як розумний компроміс поміж строгістю і складністю, при чисельному розв’язанні кінетичних рівнянь Больцмана для заряджених частинок і швидких нейтралів після перезарядки іонів та відбитих від катода атомів. Рух цих частинок розглядаємо без розсіювання і втрат енергії. Для розпиленних атомів матеріалу катода враховується розсіювання при зіткненнях з молекулами газу. Для валідації створених моделей порівнюємо результати розрахунків з наявними експериментами.

**1.2.** Даний підрозділ присвячений аналізуванню розробок газорозрядних приладів з вторинними емітерами електронів для частотної комутації струму в сотні ампер і тривалістю одиниці-сотні мікросекунд при напрузі десятки кіловольт для потужної імпульсної радіоелектронної, лазерної та іншої електрофізичної апаратури. До теперішнього часу імпульси з такими параметрами генерували в основному водневими тиратронами з термоелектронним катодом та ігнітронами з рідким ртутним катодом, які мають відомі недоліки. Напівпровідникові прилади поки що низьковольтні. Тому перспективні нові прилади, в яких застосовуються тверді холодні катода з вторинною іонно-електронною емісією. Для комутації струму до 1-2 кА доцільно застосовувати розряди низького тиску — надщільний тліючий розряд магнетронного типу (розряд в схрещених полях) або з порожнистим катодом, а для більшого струму — вакуумно-дуговий розряд. На магнетронному розряді можна створити комутатор з керуванням як по вмиканню, так і вимиканню (тому що без магнітного поля розряд гасне). Такий спосіб комутації забезпечує таситрон з сітковим керуванням, але через контракцію розряду сіткою амплітуда струму лімітована десятками ампер і є вірогідність втрати керованості через каскадну дугу “катод-сітка-анод”. У магнітокерованому комутаторі (МКК) сітка не потрібна, тобто розрядний проміжок утворюється безпосередньо катодом і анодом, це істотно підвищує робочий струм і дозволяє знизити його густину шляхом розподілу по великій поверхні холодного катода (для таситронів з термокатодом це не практично). З літератури відомо, що такий принцип керування цілком працездатний, але вимагається науково-інженерне опрацювання для його удосконалення.

Рис. 1, *а* ілюструє відомий принцип магнітного керування: без магнітного поля електрони швидко попадають на анод, і розряд неможливий. При  $B \geq B_{кр}$  у вакуумі електрони відсікаються від анода, але в газі вони можуть потрапити на анод завдяки зіткненням з молекулами газу, що призводить до його іонізації. Рис. 1, *б* демонструє вибір робочої точки при вимкненому магнітному полі. Характеристика магнітного керування (рис. 1, *в*) має дві гілки. Верхня визначає умови виникнення

магнетронного розряду при вмиканні магнітного поля. Нижня гілка визначає умови виникнення розряду при вмиканні напруги і показує мінімальну індукцію  $B_{\min}$ , при якій ще підтримується самостійний магнетронний розряд.

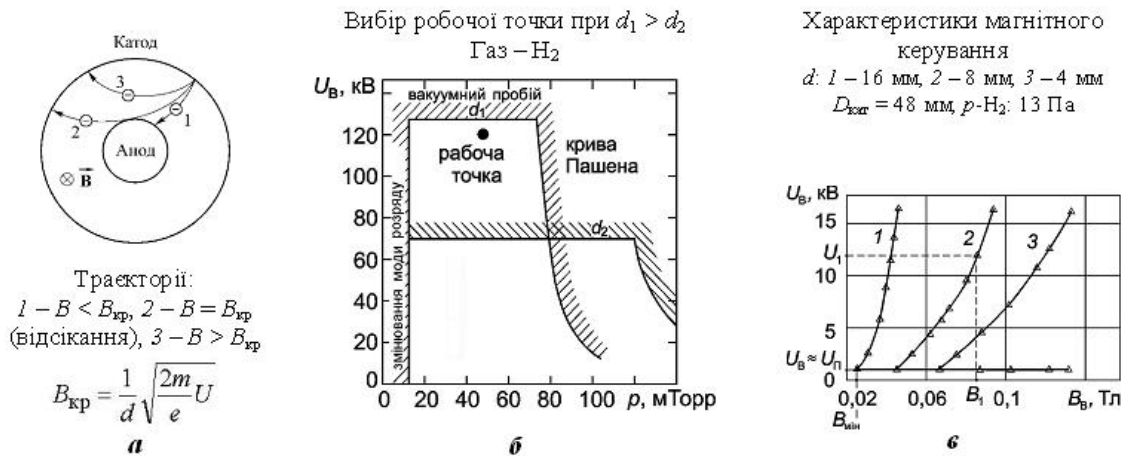


Рис. 1. Траєкторії електронів у вакуумному магнетроні (а), вибір робочої точки комутатора при вимкненому магнітному полі (б) і характеристика магнітного запалювання розряду (в).

Для ініціювання розряду при більш високій напрузі і меншому значенню  $d$  потрібні більші магнітне поле і потужність керування. З іншого боку менша величина  $d$  забезпечує швидку деіонізацію післярозрядної плазми для швидкого вимикання струму. Звідси була поставлена задача дослідження шляхів отримання задовільних характеристик МКК при мінімальній потужності магнітного керування. Потрібно удосконалити конструкцію приладу і спосіб магнітного керування.

**1.3.** Цей підрозділ присвячений аналізуванню розробок ГрСВЕ для технології конструювання поверхневих структур методом фізичного осадження тонких плівок і покриттів (ТПіП) на підкладках. Тут вторинні емітери служать джерелом не тільки заряджених частинок, але і речовини, з якої формується ТПіП. Емітери можуть бути з конденсованої речовини або з іонізованого газу та/або пари. Для досліджень вибрані розпилювальні та термоіонні випарні системи. У перших основний вторинний емітер – це катод-мішень газового розряду, в якому іони з розрядної плазми бомбардують катод, викликаючи вторинну  $\gamma$ -емісію електронів і ежекцію розпилених частинок, з яких формується ТПіП. Розрядна плазма також є вторинним емітером, але вже іонів – для бомбардування катода чи підкладки. У термоіонних системах потік осаджуваної речовини отримують шляхом випаровування вихідного матеріалу, а основним вторинним емітером іонів є плазма для осадження ТПіП з іонним бомбардуванням. Плазму генерують в розрядах різного типу.

Найбільш поширені технологічні ГрСВЕ з безперервним іонним бомбардуванням. Але почала розвиватися технологія з імпульсним іонним бомбардуванням мішені або підкладки завдяки стабільній роботі систем без дугоутворення, зниженій температурі процесу, що розширяє діапазон операційних параметрів і види робочих матеріалів. Їх можна розділити на три групи: з імпульсним бомбардуванням мішені або підкладки та імпульсним бомбардуванням обох (мішені і підкладки). Той чи інший варіант реалізується за рахунок імпульсної модуляції або плазмогенеруючого розряду, або напруги, що подається на мішень або підкладку. Проведений аналіз показав, що незважаючи на вже реалізовану

промислову технологію на базі ГрСВЕ, є потреба в суттєвому удосконаленню імпульсних систем та виборі ефективних схем імпульсної модуляції, а також в розширенні спектру технологічних задач, які можливо розв'язати.

**1.4.** В цьому підрозділі аналізувалися відомі ГрСВЕ атмосферного тиску для біомедичної апаратури; більш детальний огляд наведений в Додатку Д.1. Робота при такому тиску істотно спрощує проведення процедур, але при такому тиску нетермічні розряди, які необхідні для генерації озону і низькотемпературної стерилізації, можуть бути нестабільними. Для вирішення цієї проблеми використовують різні підходи: коротко-імпульсний режим, швидкісний продув газу і введення діелектрика між електродами, секціонування і мікроструктурування електродів. У системах, що реалізують вказані підходи, певну роль відіграє вторинна іонно-електронна і фотоелектронна емісія катода. Для біомедичної апаратури найбільш придатні розряди з діелектричним бар'єром і секційними металевими електродами. З них же для отримання концентрації по озону до  $1 \text{ г/м}^3$  більше підходить розряд з металевими електродами, що не вимагає складної конструкції електродів і електричного живлення на підвищеній частоті. При цьому необхідно вибрати такий режим розряду і конструкцію електродів, щоб уникнути застосування численних баластних резисторів. Крім того, повинна забезпечуватися лінійність керування концентрацією активного продукту і її відтворюваність під час експлуатації, а також стійкість до електричних пробоїв. Як оптимальний, був обраний і досліджений безстримерний мульти-коронний розряд, на базі якого розроблено озонотерапевтичний апарат і апробовано стерилізацію біооб'єктів.

**1.5.** Представлено методи експериментальних досліджень і обробки їх результатів з визначенням похибок і порівнянням їх з теоретичними даними.

**2. Другий розділ** дисертації присвячений розробці теоретичного базису для фізико-топологічного моделювання ГрСВЕ низького тиску в рамках фізичної кінетики і припущення багатопучкової моделі руху частинок у режимі “сильного поля”. Прийнято, що рух заряджених частинок відбувається з безперервним прискоренням і не враховуються втрати енергії швидкими частками під час нечастих пружних і непружних зіткнень типу іонізації і збудження, але враховується змінювання енергії іонів під час резонансної перезарядки. Під час перезарядки відбувається “естафетне” передавання електрона від нейтральної газової молекули іону, а енергії – у зворотному напрямку. Взаємодія між зарядженими частинками через поле просторового заряду. Звідси в плоскій системі електродів траєкторії електронів, іонів і нейтралів перезарядки – прямолінійні. Сумарний потік кожного виду частинок представляємо у вигляді сукупності моноенергетичних парціальних пучків, що починаються в місці народження цих частинок. Враховуються вторинні емісійні процеси на електродах. На катоді маємо:

- 1) *вторинну електронну емісію* ( $\gamma$ -емісію) потенційного і кінетичного типу;
- 2) *кінетичне (фізичне) розпилення* матеріалу катода при бомбардуванні іонами і швидкими нейтралами перезарядження;
- 3) *відбиття (зворотне розсіювання) від катода іонів і нейтралів* перезарядження у вигляді нейтральних атомів;
- 4) *вторинну електронну емісію порожнистого катода*, викликану бомбардуванням внутрішньої поверхні швидкими атомами, відбитими від протилежної поверхні катода;



5) *термоелектронну емісію* нагрітого твердотільного або плазмового катода.

На аноді маємо:

- 1) *непружне відбиття (зворотне розсіювання) електронів*;
- 2) *емісію іонів із заанодної плазми* при її наявності.

Враховуємо наступні фізичні процеси в міжелектродних проміжках (рис. 2):

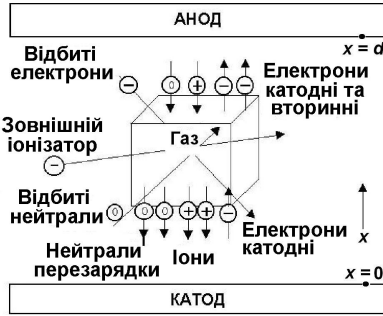


Рис. 2. Схема процесів в елементарному об'ємі газового середовища

1) *іонізацію газу електронами*, що емітуються катодом, утворюються в проміжку, інжектівані ззовні і відбиті від анода або від анодних ламелей і фольги, через яку електронний пучок виводиться в атмосферу;

2) *перезарядження іонів*;

3) *іонізацію газу іонами*, утвореними в проміжку і емітованими заанодною плазмою у разі її наявності;

4) *іонізацію газу швидкими нейтралами та їх обдирання*;

5) *беремо до уваги лише одноразову іонізацію*.

Для процесів в проміжку застосовано систему:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_e(t, x, \vec{v})}{\partial t} + v_x \frac{\partial f_e(t, x, \vec{v})}{\partial x} - \frac{e}{m} E(x) \frac{\partial f_e(t, x, \vec{v})}{\partial v_x} = \\ = 2nv\delta(v^2) \left( q_e + q_i + q_{n.п} + q_{n.o} + q_{зф} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i(t, x, v_x)}{\partial t} + v_x \frac{\partial f_i(t, x, v_x)}{\partial x} + \frac{e}{M_i} E(x) \frac{\partial f_i(t, x, v_x)}{\partial v_x} = \\ = 2nv_x\delta(v_x^2) \left( q_e + q_i + q_{n.п} + q_{n.o} + q_{зф} \right) - \\ - nf_i(t, x, v_x) \sigma_{\Pi}(v_x) v_x + 2nv_x\delta(v_x^2) \int f_i(t, x, v'_x) \sigma_{\Pi}(v'_x) v'_x dv'_x, \\ q_{\alpha} = \int f_{\alpha}(t, x, \vec{v}') \sigma_{\alpha}(v') v' dv', \quad \alpha = e, n.o, \\ q_{\beta} = \int f_{\beta}(t, x, v'_x) \sigma_{\beta}(v'_x) v'_x dv'_x, \quad \beta = i, n.п, \\ \frac{\partial f_{n.п}(t, x, v_x)}{\partial t} + v_x \frac{\partial f_{n.п}(t, x, v_x)}{\partial x} = nf_i(t, x, v_x) \sigma_{\Pi}(v_x) v_x, \\ \frac{\partial f_{n.o}(t, x, \vec{v})}{\partial t} + v_x \frac{\partial f_{n.o}(t, x, \vec{v})}{\partial x} = 0, \\ j_p(t, x) = j_i(t, x) + j_e(t, x), \quad I_p(t) = I_i(t) + I_e(t), \\ j_e(t, x) = |e \int f_e(t, x, \vec{v}') v'_x dv'_x|, \quad j_i(t, x) = |e \int f_i(t, x, v'_x) v'_x dv'_x|, \\ I_e(t) = \frac{S}{d} \int_0^d j_e(t, x) dx, \quad I_i(t) = \frac{S}{d} \int_0^d j_i(t, x) dx, \\ E(x) = -\frac{d\phi(x)}{dx}, \quad \frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho_e(x) + \rho_i(x)}{\epsilon_0}, \\ \rho_e(x) = -e \int f_e(t, x, \vec{v}') d\vec{v}', \quad \rho_i(x) = e \int f_i(t, x, v'_x) dv'_x, \end{aligned} \tag{1}$$

де функції розподілу електронів –  $f_e$ , іонів –  $f_i$ , високоенергетичних нейтралів перезарядки –  $f_{n.п}$ , одноатомних нейтралів, відбитих від катода –  $f_{n.o}$ ,  $\phi$  – потенціал,  $t$  – час;  $x$  – вісь координат, напрямлена від катода до анода;  $v_x$  – проекція швидкості  $v$  на вісь  $x$ ;  $m$  – маса електрона;  $M_i$  – маса іона;  $n$  – концентрація газових частинок (щільність

газу);  $\delta$  – дельта-функція Дірака; перерізи іонізації газу електроном –  $\sigma_e$ , іоном –  $\sigma_i$ , нейтралом перезарядки –  $\sigma_{n.\Pi}$  і відбитим від катода атомом –  $\sigma_{n.o}$ , причому  $\sigma_{n.\Pi}$  і  $\sigma_{n.o}$  є сумою перерізів іонізації газу нейтралом і його обдирання;  $\sigma_{\Pi}$  – переріз перезарядки, який у випадку молекулярних газів є сумою перерізів молекулярної та дисоціативної перезарядки, при цьому два швидкі одноатомні нейтралі вважалися еквівалентними одному молекулярному з тією ж швидкістю;  $q_{3\Phi}$  – коефіцієнт іонізації газу зовнішнім фактором;  $j_p$  – густина розрядного струму;  $j_e(i)$  – густина струму електронів (іонів);  $I_p$  – розрядний струм;  $I_e(i)$  – струм електронів (іонів), усереднений за довжиною проміжку;  $S$  – площа катода і анода;  $\rho_e(i)$  – густина просторового заряду електронів (іонів);  $\epsilon_0$  – електрична константа. Використано апроксимації  $\sigma_e(v)$ ,  $\sigma_i(v)$ ,  $\sigma_{n.\Pi}(v)$ ,  $\sigma_{n.o}(v)$  і  $\sigma_{\Pi}(v)$  [4, 7, 17, 18, 43-45, 51, 73, 74].

Система (1) доповнюється граничними і початковими умовами і рівняннями для електричного кола. Граничні умови систематизовано за типом електродів і розряду між ними.

#### 1. Катод і анод – металеві.

1.1. Розряд - несамотійний з фіксованим струмом емісії електронів у проміжок з боку катода  $j_{e.k}$  за рахунок зовнішньої інжекції через катод-сітку або термо- і вторинної емісії в режимі насичення:

$$j_e(0) = j_{e.k} = \text{Const}, \quad (2)$$

$$f_e(0, \vec{v}) = \frac{2j_e(0)\delta(v^2)}{e}, \quad (3)$$

$$vf_e(d, \vec{v})|_{v_x < 0} = \int_{v'_x > 0} \vec{v}' f_e(d, \vec{v}') K(\vec{v}, \vec{v}') d\vec{v}', \quad (4)$$

$$f_i(0, v_x)|_{v_x > 0} = 0, \quad (5)$$

$$f_i(d, v_x) = 0, \quad (6)$$

$$f_{n.\Pi}(0, v_x)|_{v_x > 0} = 0, \quad f_{n.\Pi}(d, v_x) = 0, \quad (7)$$

$$vf_{n.o}(0, \vec{v})|_{v_x > 0} = \int_{v'_x < 0} v'_x [f_i(0, v_x) + f_{n.\Pi}(0, v_x)] \Psi(\vec{v}, v'_x) dv'_x, \quad (8)$$

$$f_{n.o}(d, \vec{v})|_{v_x < 0} = 0, \quad (9)$$

$$q_{3\Phi} = 0, \quad (10)$$

$$\varphi(0) = 0, \quad \varphi(d) = U, \quad (11)$$

де  $K$  – функція перетворення спектра швидкостей електронів на аноді, у спектр відбитих електронів,  $\Psi$  – функція перетворення спектра іонів і нейтралів перезарядки на катоді у спектр відбитих нейтральних атомів (відбиття важких частинок не залежить від їх заряду). Ця система є моделлю газонаповнених електронних гармат та інших приладів.

1.2. Розряд - несамотійний з фіксованим струмом емісії іонів в проміжок з боку анода за рахунок зовнішньої інжекції через анод-сітку: зберігаються умови (3)-(5) і (7)-(11), на аноді маємо нові умови:

$$j_i(d) = j_{i.a} = \text{Const}, \quad (12)$$

$$f_i(d, v_x) = \frac{2j_i(d)\delta(v^2)}{e}. \quad (13)$$

На катоді може зберігатися умова (2) для  $j_e(0)$  або у разі вторинної емісії:

$$j_e(0) = j_{e,\gamma} = e \left| \int [\gamma_i(v'_x) f_i(0, v'_x) + \gamma_n(v'_x) f_{n,п}(0, v'_x)] v'_x dv'_x \right|, \quad (14)$$

де  $\gamma_i$  і  $\gamma_n$  – коефіцієнти вторинної емісії катода під дією бомбардування іонами і нейтралами перезарядки, які є апроксимаціями експериментальних даних.

1.3. *Розряд - несамостійний* з іонізацією газу за рахунок зовнішнього фактора, наприклад, електронами  $\beta$ -випромінювання від ізотопів, введених в систему. В такому випадку змінюється (10) на  $q_{зф} \neq 0$ , а на катоді і аноді може додаватися відбиття випромінювання і відповідна вторинна емісія.

1.4. *Розряд – самостійний* (“темний”, “тихий” або високовольтний на лівій гілці кривої Пашена), він виникає при наявності деяких запальних/початкових електронів в проміжку і підтримується за рахунок вторинної емісії катода і іонізації газу. Для цього розряду має виконуватися умова самопідтримки, яка доповнює систему рівнянь (1):

$$k = j_{e,\gamma} / j_{e,к} = 1, \quad (15)$$

де  $k$  – коефіцієнт відтворення електронів на катоді. Він чисельно дорівнює кількості електронів, емітованих катодом при бомбардуванні його частинками, утвореними в проміжку при емісії одного електрона.  $j_{e,к}$  задається, а  $j_{e,\gamma}$  розраховується за формулою (14). В умовах нелокальної кінетики (14) можна переписати у вигляді

$$\Gamma M = 1, \quad (16)$$

де  $\Gamma$  – інтегральний коефіцієнт вторинної електронної емісії катода, що дорівнює  $j_{e,\gamma} / j_i(0)$ , він враховує всі види вторинної емісії, але віднесений до струму іонів, тобто  $\Gamma$  – аналог 3-го коефіцієнта Таунсенда;  $M$  – коефіцієнт, що характеризує генерацію заряджених частинок у проміжку, що чисельно дорівнює кількості іонів, утворених у проміжку при емісії одного електрона і прибулих до катода. Для  $M$  можна записати:

$$M = j_i(0) / j_{e,к} = [j_e(d) - j_{e,к}] / j_{e,к}. \quad (17)$$

Граничні умови для самостійного розряду при відсутності іонізації зовнішнім фактором або інжекції частинок в проміжок визначаються (3)–(11), (14) і (15). Умови (15) або (16) виконуються при заданій  $U$  при певних  $n$  (або  $p$ ), які потрібно розраховувати, і, навпаки, при заданому  $n$  необхідно розраховувати  $U$ , при якому виникає самостійний розряд. Перший варіант доцільніший, оскільки в деяких газах, зокрема, в гелію, залежність  $U(n)$  – тризначна, так як має зигзагоподібний характер.

2. *Катод – плазмовий або термоелектронний з необмеженою емісією, анод – металевий*

*Розряд - несамостійний* і підтримується за рахунок емісії катода. Розподіл потенціалу відповідає випадку обмеження струму просторовим зарядом електронів, а у високому вакуумі зв'язок між  $j_e$ ,  $U$  і  $d$  виражається рівнянням Чайльда-Ленгмюра (законом “степені 3/2”). Граничні умови (3)–(11) зберігаються, а на катоді задаємо:

$$E(0) = E_к = 0. \quad (18)$$

Умова (18) лімітує електронний струм катода, який є розрахунковим параметром. Ця система є моделлю газонаповнених електронних гармат та інших електронних приладів.

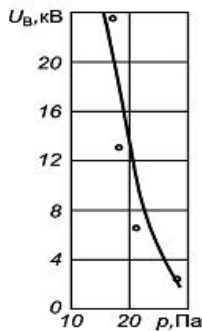
3. *Катод - металевий, анод – границя плазмової області*

*Розряд - несамостійний*, підтримується за рахунок емісії іонів з анодної плазми. При відсутності емісії катода або її фіксованому значенні маємо граничні умови (2), (3), (5), (7)–(11), (13), а для поля на аноді задаємо:

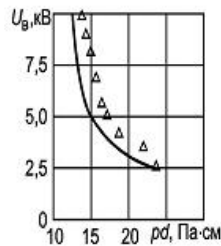
$$E(d) = E_a = 0. \quad (19)$$

При вторинній емісії катода під дією іонів і нейтралів перезарядки маємо граничні умови (3), (5), (7)-(11), (13), (14) і (19). Умова (19) виконується при певному іонному струмі з анода, який є розрахунковим параметром. Ця система є моделлю катодних шарів (КШ) газового розряду і шарів біля негативного електрода в плазмі та іонних гармат (джерел іонних пучків) з плазмовим емітером.

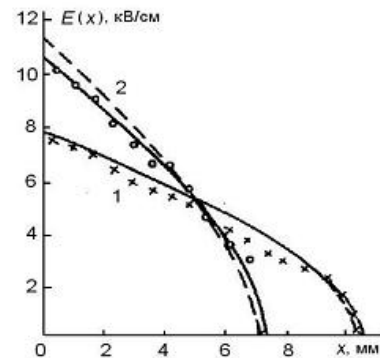
Розв'язання системи (1) разом з граничними і початковими умовами базується на зведенні до еквівалентної системи інтегральних рівнянь. Алгоритм чисельного розв'язку складається з двох вкладених циклів: у зовнішньому розраховується розподіл електричного поля по відомому розподілу просторового заряду, а у внутрішньому – процеси об'ємної іонізації газу, перезарядки іонів і відбиття швидких частинок від електродів, а потім розподіл потоків швидких частинок і просторового заряду при фіксованому розподілі електричного поля. Алгоритм заснований на методі “великих частинок” і прямому імітаційному моделюванні елементарних процесів в багатопучковому наближенні. Даний підхід можна розглядати як аналог методу Монте-Карло з анізотропним розсіюванням швидких частинок при зіткненнях “тільки вперед” без втрат енергії. Кількість парціальних пучків кожного сорту частинок визначалася кількістю вузлів розрахункової сітки.



Газ –  $H_2$ ;  $d = 16$  мм  
Електроди – Cu



Газ –  $N_2$   
Електроди – Cu, Ta



Електроди – Mo;  $U$ , кВ: 1 – 5,1; 2 – 4,97;  $p$ , Па: 1 – 64,4; 2 – 90;  $d$ , мм: 1 – 10,6; 2 – 7,2.

**Рис. 3.** Напруга виникнення розряду на лівій гілці кривої Пашена у водню та азоту. Експеримент – Клярфельда Б.Н., Гусевої Л.Г. і Покровської-Соболевої А.С.

**Рис. 4.** Електричне поле в КШ аномального тліючого розряду в лазерній трубці з гелієм. Експеримент – Lee S.A. *et al.*

Розрахунки узгоджуються з експериментом (усереднена відносна похибка біля 10 %) при використанні нами апроксимацій експериментальних даних із публікацій різних авторів для елементарних процесів, в першу чергу для коефіцієнтів  $\gamma$ -емісії. Це ілюструють, наприклад, рис. 3 і рис. 4, на яких показані розраховані результати та усереднені дані експериментів в умовах, для яких відомі коефіцієнти  $\gamma$ -емісії. Рис. 4 показує, що врахування іонізації гелію в КШ (штрихова лінія) не сильно позначається на результатах розрахунку через малі перерізи іонізації електронами внаслідок їх великої енергії, а для іонів через їх низьку енергію (іони здійснюють близько 20 перезаряджень, і їх енергія  $\sim 200$  еВ). Однак, перезарядка іонів є найважливішим процесом, що визначає  $E(x)$  і товщину КШ. Відзначимо, що кінетичний підхід дозволив уникнути введення в рівняння руху слабо обґрунтованих значень рухливості іонів в сильному полі, а, у цілому, створена модель працює задовільно.

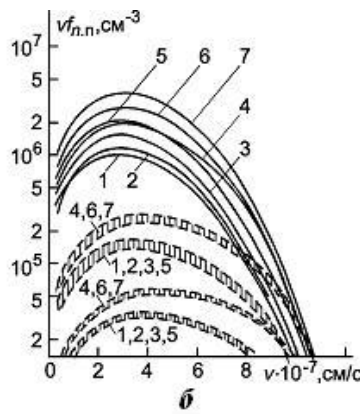
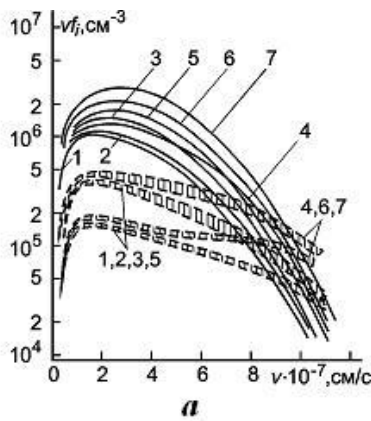
Було виконано моделювання та дослідження декількох ГрСВЕ, що представляють практичний інтерес. Перша система (№ 1.1) – на основі високовольтного розряду (ВР) з катодом з фіксованою емісією  $j_{e.k}$  та металевим анодом. Її дослідження дозволило виявити особливості механізмів розрядів і так званих “пробіїв” у високовольтних приладах і джерелах швидких частинок, а також прогнозувати їхню електричну міцність. Для дослідження механізму ВР у водню було використано сім моделей, отриманих відкиданням або перетворенням інтегралів зіткнень. Сьома модель – найбільш повна, вона представлена рівняннями (1)-(11). Перша модель зі всіх іонізаційних процесів включає тільки іонізацію катодними електронами. У всіх моделях враховано перезарядку. Апроксимації для елементарних процесів були апробовані раніше при розрахунку кривих Пашена по сьомій моделі (рис. 3). В табл. 1 показані значення для семи моделей густини іонного струму на катоді  $j_{i.k}$  і густини потоку швидких нейтралів перезарядки на катоді  $\Gamma_k$ .

**Таблиця 1.** Розрахунок параметрів ВР з катодом в режимі насичення струму емісії

Параметр	$d$ , см	Номер моделі						
		1	2	3	4	5	6	7
$j_{i.k} \cdot 10^6$ , А/см <sup>2</sup>	0,32	1,654	1,678	1,744	2,183	1,777	2,316	2,372
	0,64	3,308	3,406	3,761	4,445	3,942	5,173	5,492
	1,6	8,204	8,836	11,83	11,73	14,53	17,98	23,34
$e\Gamma_k \cdot 10^6$ , А/см <sup>2</sup>	0,32	0,351	0,359	0,372	0,621	0,384	0,650	0,671
	0,64	1,402	1,470	1,600	2,553	1,730	2,836	3,066
	1,6	8,764	9,87	12,58	17,30	16,81	23,48	31,90
Характеристика моделей		$q_i = q_{n.п} = q_{n.o} = 0$ , К = 0		$q_{n.o} = 0$ , К = 0	$q_i = 0$ , $q_{n.п} = 0$ , $q_{n.o} = 0$	К = 0	$q_{n.o} = 0$	
$U = 13$ кВ; тиск водню $p = 18,7$ Па; $j_{e.k} = 10^{-4}$ А/см <sup>2</sup> , матеріал електродів – мідь								

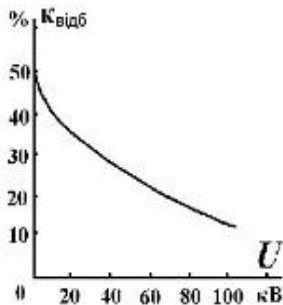
На рис. 5 показані функції розподілу потоків іонів і нейтралів перезарядки на катоді для семи моделей, і можна бачити, по-перше, широкий спектр швидкостей частинок, обумовлений перезарядкою, і, по-друге, високий внесок у генерацію іонів відбитими від анода електронами вже при малих  $pd$ .

На рис. 6 показані залежності густини іонного струму на катоді від  $pd$  і змінювання струму при врахуванні у моделі нових елементарних процесів (нижні індекси при  $j$  вказують номер моделі). Тут же показано співвідношення між  $d$  і середніми довжинами пробігу іонів для іонізації ( $\lambda_{i.i}$ ) і для перезарядки ( $\lambda_{i.п}$ ), а також для іонізації електронами ( $\lambda_{e.i}$ ). Роль іонізації важкими частинками, включаючи відбитими від катода атомами, зростає із збільшенням  $pd$ . При наближенні  $pd$  до  $pd_{пр}$  (до точки кривої Пашена) внесок електронів, відбитих від анода, і нейтральних атомів, відбитих від катода, у генерацію іонів становить близько 50 %! Таким чином, у ВР електроди виступають як колектори частинок або вторинні емітери низькоенергетичних частинок, так і як дифузні відбивачі швидких, здатних іонізувати газ, частинок. Раніше, відбиті від катода атоми не враховувалися в теорії розрядів низького тиску, хоча відбиття атомних частинок від поверхні відоме.



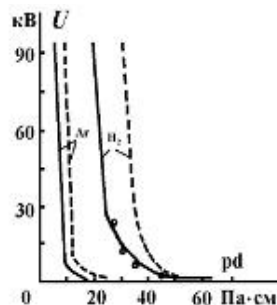
$U = 13$  кВ;  $j_{e,k} = 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>;  $p = 18,7$  Па;  $d$ , см: 0,32 – штрих-пунктир, 0,64 – штрихова лінія, 1,6 – суцільна лінія.

**Рис. 5.** Функції розподілу потоків іонів  $H_2^+$  (а) і нейтралів перезарядки  $H_2^0$  (б) на катоді. Числа на рисунку показують номер моделі ВР.



Електроди – Сu

**Рис. 7.** Інтегральний коефіцієнт відбиття атомів  $H^0$  від катода вздовж кривої Пашена.



Електроди – Сu

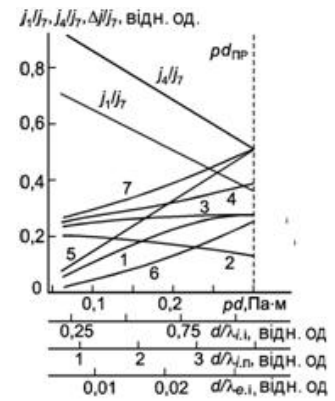
**Рис. 8.** Криві Пашена для Ar і  $H_2$ . Штрихові лінії – відбиття атомів від катода не враховувалося. Значки: див. рис. 3.

атомів. Однак  $K_{\text{відб}}$  важких  $Ag^0$  менше, ніж для  $H^0$ .

Дана модель дозволила дослідити вплив  $j_{e,k}$  на поле  $E(x)$  і  $\rho_i(x)$  в проміжку, на первеанс і перехід розряду у плазмову форму розряду, що узгоджуються з експериментом.

Моделювання виникнення розряду на лівій гілці кривої Пашена для He є гарним тестом, оскільки крива має особливість у вигляді виступу праворуч, де одному значенню  $pd$  відповідають 3 значення напруги виникнення розряду  $U_B$  (рис. 9). Ця особливість спостерігалася в експериментах і обговорювалася в літературі, але не всі можливі елементарні процеси та фактори бралися до уваги, і повної ясності в поясненні даної особливості немає. Для дослідження ми використовували модель № 1.4, у якій варіювали коефіцієнти  $\gamma$ -емісії та перерізи різних процесів для дослідження їх ролі при різних  $U_B$ .

Розрахунки показали, що в діапазоні  $pd > 0,5$  Па·м іони гелію здійснюють десятки перезаряджень, відповідно їх енергія, як і енергія нейтралів перезарядки, набагато менша  $eU_B$ . Тому при  $U_B$  до декількох кіловольт іонізація важкими частинками не істотна, і нові заряджені частинки генеруються в основному електронним ударом. Через екстремальний характер  $\sigma_e(v)$  “пробійне”  $pd_{\text{пр}}$ .

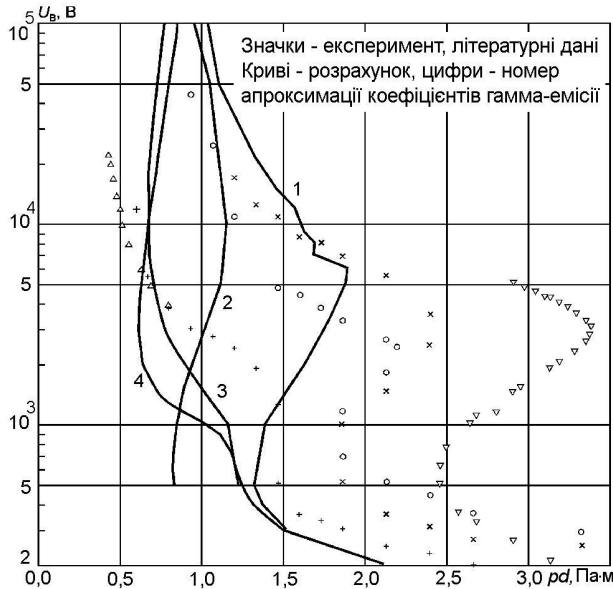


Позначення: 1 –  $(j_6 - j_4)/j_7$ , 2 –  $(j_4 - j_2)/j_7$ , 3 –  $(j_6 - j_3)/j_7$ , 4 –  $(j_7 - j_5)/j_7$ , 5 –  $(j_7 - j_4)/j_7$ , 6 –  $(j_7 - j_6)/j_7$ , 7 –  $(j_7 - j_3)/j_7$ .  $U = 13$  кВ;  $j_{e,k} = 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>

**Рис. 6.** Залежність  $j_{i,k}$  від  $pd$  в різних моделях ВР.

На рис. 7 показано інтегральний коефіцієнт відбиття  $K_{\text{відб}}$  атомів  $H^0$  від катода вздовж кривої Пашена, і як видно, від катода відбивається досить багато швидких атомів, здатних іонізувати газ. Роль цих атомів проявляється в усьому діапазоні напруги і різних газах (рис. 8), оскільки зниження коефіцієнта відбиття при збільшенні розрядної напруги в якійсь мірі компенсується зростанням  $\sigma_{n,0}$ .

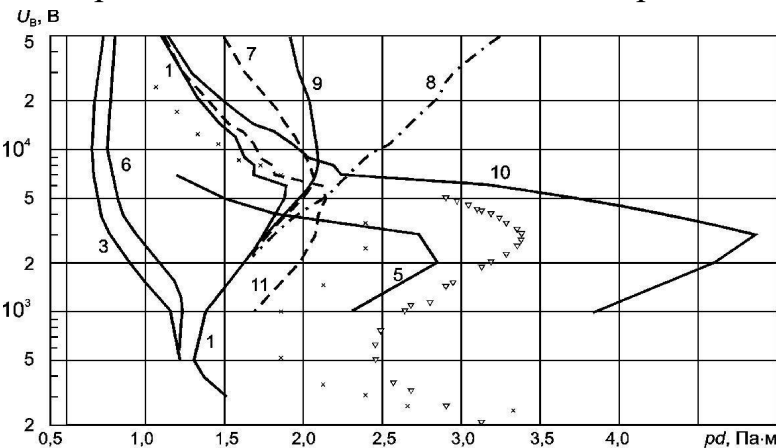
зменшується з  $U_B$ , а потім зростає до повороту ліворуч, де енергія іонів і нейтралів перезарядки тут вже перевищує поріг для кінетичної  $\gamma$ -емісії і збільшується емісія електронів, вони генерують більше нових заряджених частинок, і починається іонізація газу важкими частинками. В результаті, виникнення самостійного розряду стає можливим при меншому  $pd$ .



$\gamma_i = \gamma_n + \gamma_k$ ,  $\gamma_n = \gamma_k$   
 $\gamma_n$  – потенційна емісія,  $\gamma_k$  – кінетична емісія  
 Матеріал катода в експериментах:  
 × – “чистий” Ni, o – “чиста” сталь, + – “брудна” сталь, Δ – “брудний” метал, ▽ – невідомий метал  
 Для розрахунку кривих  $U_B(pd)$  використовувалися апроксимації експериментальних даних  $\gamma$ -коефіцієнтів, відомих з літератури.  
 Матеріал катода в розрахунках:  
 1 – “чистий” Ni,  $\gamma_{n.1} = 0,16$ , поріг 670 eV для  $\gamma_{k.1}$ ;  
 2 – “чистий” Ni,  $\gamma_{n.1} = 0,1$ , немає порогу для  $\gamma_{k.2}$ ;  
 3 – “хім. очищ.” Au, Cu, бронза,  $\gamma_{n.1} = 0,2$ , немає порогу для  $\gamma_{i.k.2}$ , поріг 20 eV для  $\gamma_{n.3}$ ;  
 4 – імітація “брудного” Ni,  $\gamma_{n.1} = 0,1$ , немає порогу для  $\gamma_{i.k.4}$ ,  $\gamma_{k.4} = 5 \times \gamma_{k.2}$ , поріг 100 eV для  $\gamma_{n.4}$

Рис. 10. Розрахункові криві Пашена для He і експериментальні дані.

На рис. 10 наведені експериментальні дані з публікацій різних авторів, які характеризуються великим розкидом. Дані для малих значень  $pd$  не виявляють аномальності у вигляді виступу. Виходячи з припущення про сильний вплив вторинно-емісійних властивостей катода, були виконані розрахунки з різними апроксимаціями коефіцієнтів  $\gamma$ -емісії; їх результати також наведені на рис. 10. Як видно, вони укладаються в зону розсіювання результатів вимірювань. При цьому найбільш близькі один до одного розрахунок (крива 1) і вимірювання для “чистих” катодів, а також розрахунки (криві 3 і 4) і вимірювання для “технічно чистих” (тобто не зовсім чистих) катодів. Об'єктивно важко оцінити ступінь чистоти поверхні катодів і реальні коефіцієнти їх вторинної емісії з публікацій по експериментальних кривих Пашена, проте близькість положень розрахованих кривих і експериментальних даних свідчить про адекватність запропонованих моделей і апроксимацій.



Значки (експеримент, див. рис. 10) і криві 1 і 3 відповідають значкам і кривим 1 і 3 на рис. 10

Рис. 11. Криві Пашена для різних моделей розряду в He.

Неврахування для кінетичної емісії енергетичного порогу, як і очікувалося, віддаляє криву 2 від кривої 1 і не виявляє явного виступу.

Для дослідження ролі перезарядки іонів і іонізаційних процесів з участю частинок різного походження на формування кривих Пашена в гелію були виконані розрахунки з модифікованими перерізами зіткнень. Результати розрахунків

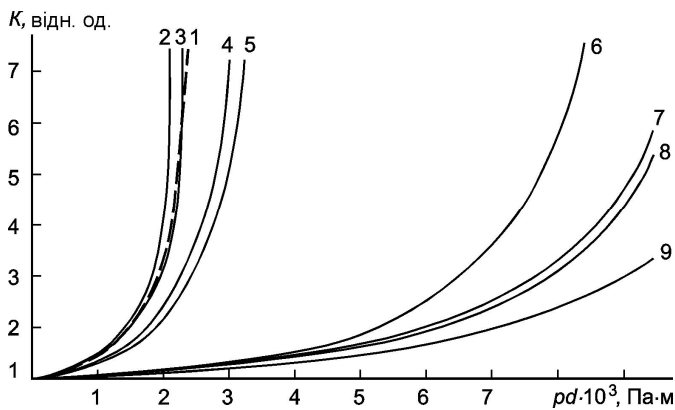
наведено на рис. 11, де криві 1, 7-11 побудовані за результатами розрахунку системи з “чистим” Ni (1-а апроксимація для  $\gamma$ -емісії), а криві 3, 5, 6 – для випадку “технічно чистого” Au (3-я апроксимація коефіцієнтів  $\gamma$ -емісії). Для кривої 5 значення  $\sigma_{\Pi}$  в 2 рази більше, ніж для кривої 3; і, відповідно, зменшуються енергія іонів і атомів перезарядки та коефіцієнти  $\gamma$ -емісії, а в результаті точка повороту ліворуч значно зсувається до більших  $U_B$  і  $pd$ . Звідси випливає висновок про необхідність використовувати точні дані для  $\sigma_{\Pi}$ , а будь-які домішки в гелію, які впливають на перезарядку, будуть також впливати на хід кривої Пашена. Для кривої 6 було зменшено в 2 рази  $\sigma_i$  порівняно з кривою 3. Як видно, іонізація іонами спостерігається вже при напрузі близькій до 1 кВ, але суттєве зменшення  $\sigma_i$  не змінює істотно  $U_B$ . У той же час іонізація швидкими атомами He<sup>0</sup> після перезарядки і відбитими від катода дуже важлива для самопідтримки розряду. Так, зменшення  $\sigma_{n,\Pi} + \sigma_{n,o}$  в два рази для кривої 7 призводить до помітного зсуву її праворуч відносно кривої 1. При  $\sigma_{n,\Pi} = \sigma_{n,o} = 0$  змінюється вид залежності  $U_B(pd)$ , див. криву 8. При усуненні з моделі відбиття іонів і атомів перезарядки від катода ( $\Psi=0$ ) отримуємо криву 9. Зазначимо, що криві 1, 7-9 починають розходитися при  $U_B$  поблизу 4 кВ, тому можна зробити висновок, що при цій напрузі починає проявлятися іонізація швидкими атомами He<sup>0</sup>, а при десятках кіловольт вона стає основним механізмом генерації заряджених частинок. Важлива роль швидких атомів у He-розряді пояснюється їх великою кількістю порівняно з іонами. У випадку кривих 3 і 6 (для “забрудненого” катода і низьких пробійних  $pd$ ) завдяки іонізації важкими частинками розходження між кривими спостерігається вже при  $U_B \sim 0,6$  кВ. Це можливо тому, що іони рідше перезаряджаються і мають набагато більшу енергію, ніж з “чистою” катодною поверхнею і меншим  $\gamma$ -коефіцієнтом.

Для визначення ролі електронів, відбитих від анода, були розраховані криві  $U_B(pd)$ , для яких інтегральний коефіцієнт відбиття був нульовим (крива 10) або був зменшений до 70 % (крива 11) від свого нормального значення 0,34 для Ni (крива 1). Порівняння кривих 1, 10 і 11 показує, що іонізація відбитими електронами є досить важливим процесом, що призводить до зменшення  $pd$ , при яких можливе запалювання розряду в гелію. Зниження коефіцієнта відбиття електронів від анода призводить до розширення зигзагоподібної ділянки кривої  $U_B(pd)$ . Значимість відбиття електронів обумовлена тим, що значно збільшується довжина траєкторії електронів у міжелектродному проміжку і ймовірність іонізації ними газу. При цьому одночасно збільшуються інтенсивність генерації іонів поблизу анода, довжина пробігу іонів і атомів перезарядки і ймовірність іонізації ними газу.

Для досліджування газонаповнених електронних приладів, зокрема, первеансу електронних гармат, була побудована модель до системи № 2 з плазмовим чи термоелектронним катодом з необмеженою емісією, анод – металевий. Вплив  $pd$  і напруги  $U_a$ , а також вторинно-емісійних та інших елементарних процесів на коефіцієнт газового підсилення електронного струму  $K = j_{e,a}/j_0$ , тобто на збільшення первеансу, наданий на рис. 12. Тут  $j_{e,a}$  – густина струму електронів на аноді,  $j_0$  – густина струму у вакуумі ( $p = 0$ ) по рівнянню “степені 3/2”; величини  $p$  враховують



температуру газу. Розрахунки по повній моделі (крива 2), яка максимально враховує елементарні процеси, відповідають результатам вимірювань (крива 1).



Газ – аргон  
 $U_a = 1$  кВ (криві 1–5),  $U_a = 10$  кВ (криві 6–9).  
 Штрихова крива 1 – експериментальні дані із літератури. Криві: 2, 6 – повна модель; 3, 7 – без перезарядки; 4, 8 – без відбиття електронів від анода; 5, 9 – без перезарядки, відбиття електронів від анода, іонізації вторинними електронами, іонами і нейтралами

**Рис. 12.** Залежність коефіцієнта газового підсилення  $K$  від  $pd$  газонаповненого електронного прилада при різному ступені врахування елементарних процесів

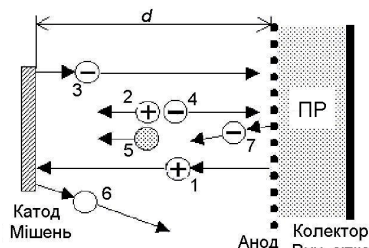
Збільшення  $K$  при збільшенні  $pd$  пояснюється частковою компенсацією  $\rho_e$  зарядом іонів. При критичній величині  $pd_{кр}$  характеристика стає вертикальною, і система переходить в плазмовий режим. Механізм утворення плазми пояснює розподіл  $E(x)$  для поля в міжелектродному проміжку. При малому  $pd \approx 0$  напруженість поля  $E(x) \sim x^{1/3}$ , тобто близька до поля за законом “степені 3/2”. Однак, при формулюванні цього закону не враховували відбиття електронів від анода, тому мають місце деякі відмінності. При збільшенні  $pd$  розподіл  $E(x)$  стає немонотонний, і при  $pd_{кр}$  поле спадає до нуля перед анодом. В області мінімуму поля утворюється потенційна “яма”, в якій накопичуються заряджені частинки з формуванням прианодної плазми. Подальше необмежене збільшення відбору електронного струму з катода призведе до формування нової розрядної форми, яка залежить від умов в системі. При збільшенні  $U_a$  характеристики газового підсилення зміщуються в бік більших  $pd$  через зменшення ймовірності іонізації газу електронами. Крім катодних електронів газ іонізують електрони, відбиті від анода, які вносять свій внесок, як при малих, так і великих  $U_a$ ; це впливає з порівняння кривих 2 і 4, 6 і 8. Роль процесів з участю важких частинок (іонізації газу і перезарядки іонів, що призводить до збільшення їх просторового заряду) зростає зі збільшенням  $U_a$  і  $pd$ , що впливає з порівняння кривих 4 і 5, 8 і 9.

Варіант розглянутої системи має порожнистий (щілинний) емітерний електрод з плазмою всередині нього, при цьому плазмова поверхня, яка емітує електрони до анода, формується біля торця емітерного електрода. Аналіз засвідчує, що підвищення електронної емісії плазми відбувається за рахунок: 1) приходу іонів в плазму з боку анода (внаслідок, так би мовити,  $\gamma$ -емісії плазми); 2) збільшення щільності плазми завдяки іонізації газу  $\gamma$ -електронами, які емітуються поверхнею стінок порожнини під дією бомбардування іонами, і нейтральними атомами, відбитими від протилежної поверхні стінок. Для реалізації другого способу на емітерний електрод подається негативний потенціал щодо плазми  $\phi_e$ , при якому плазмові іони отримують у шарі біля стінок енергію, достатню для кінетичної вторинної електронної емісії. Зазначені ефекти можуть підвищити емісію плазмового катода на сотні відсотків. При цьому збільшення  $\gamma$ -емісії внутрішніх стінок емітерного електрода з Мо за рахунок бомбардування відбитими атомами –

найбільша у випадку атомів  $H^0$  (робочий газ –  $H_2$ ) і буде становити десятки відсотків при  $\phi_e = 0,2 \dots 2,0$  кВ.

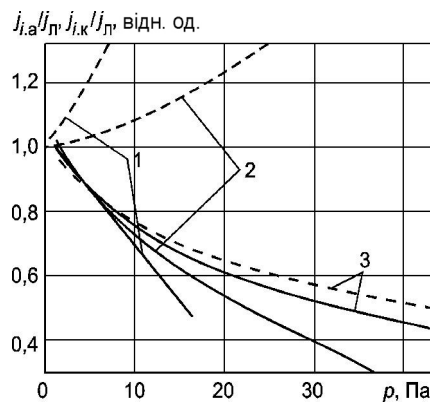
Наступні дослідження відносяться до систем № 1.2 і № 3 з плазмовим анодом, катод – металевий, тобто до іонного діода, розрядні процеси в якому підтримуються іонною емісією анода (рис. 13). Ці системи відображають властивості різноманітних ГрСВЕ: КШ розрядів тліючого типу, електронних гармат і рентгенівських трубок з холодним катодом, іонних прискорювачів і нейтронних генераторів. Плазмовий анод з густиною струму іонної емісії  $j_{i.a}$  може бути утворений відкритою плазмою негативного світіння у разі самостійного розряду (в цьому випадку говорять про  $\delta$ -емісію) або створюватися додатковим плазмовим розрядом (ПР). Потенціал плазмового анода визначається напругою  $U$ , яка подається на окремий електрод у випадку відкритої плазми або на металевий сітчастий анод перед ПР.

Першими розглянуто результати, отримані з моделлю діода, в якій анодом є відкрита поверхня плазми ПР. Модель представлено рівняннями (1), (3), (5), (7)-(11), (13), (14) і (19). Враховувалася  $\gamma$ -емісія катода під дією іонів і нейтралів перезарядки та їх відбиття від катода, але відбиття електронів від анода не враховувалася. Умова (19) виконується при певному значенні  $j_{i.a}$ , що розраховувалася в рамках самоузгодженої задачі. На рис. 14 і рис. 15 наведено результати для системи з  $H_2$ -наповненням і Cu-катода, де  $j_L$  – струм для вакуумного іонного діода за формулою Чайльда-Ленгмюра, загальний струм  $j = j_{i.a} + j_{e.a} = j_{i.k} + j_{e.k} = j_{i.k} + j_\gamma$ , струм  $j_\gamma = j_{\gamma.i} + j_{\gamma.n}$ , а  $j_{\gamma.i}$  і  $j_{\gamma.n}$  – струми  $\gamma$ -емісії катода під дією іонів і нейтралів перезарядки, відповідно. Числові результати узгоджуються з аналітичним розв'язком.



1 – іони з плазми, 2 – іони, що створюються у проміжку при іонізації і перезарядці, 3 –  $\gamma$ -електрони, 4 – електрони, що створюються у проміжку при іонізації, 5 – нейтралі перезарядки, 6 – швидкі атоми, відбиті від катода, 7 – електрони, відбиті від металевих частин анода

**Рис. 13.** Схема ГрСВЕ (іонного діода) з анодним емітером іонів.



$U$ : 1 – 50 кВ, 2 – 13 кВ, 3 – 1 кВ

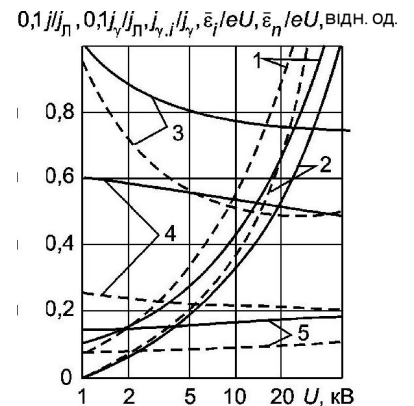
$d = 1$  см

Суцільні криві –  $j_{i.a}/j_L$

Штрихові криві –  $j_{i.k}/j_L$

Газ –  $H_2$ , катод – Cu

**Рис. 14.** Залежність іонних струмів на аноді і катоді від  $p$ .



$pd$ : 0,033 Па·м (суцільні криві) і 0,13 Па·м (штрихові криві)

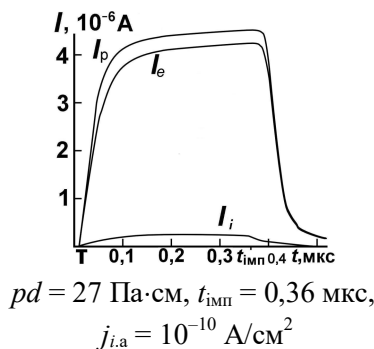
Криві: 1 –  $j/j_L$ , 2 –  $j_\gamma/j_L$ , 3 –  $j_{\gamma.i}/j_\gamma$ , 4 – середня відн. енергія іонів  $\varepsilon_{i,ср}/eU$ , 5 – середня відн. енергія нейтралів перезарядки  $\varepsilon_{n,ср}/eU$

**Рис. 15.** Залежність параметрів іонного діода від  $U$ .

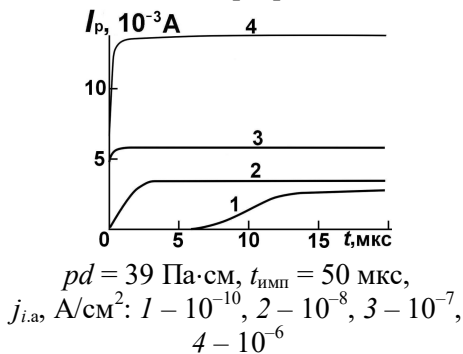
Розрахунки поля в КШ аномального тліючого розряду в He (рис. 4) і параметрів діодного розпилювального пристрою з Ag (розділ 4) також узгоджуються з експериментом. Також був розглянутий варіант з мілкосітчастим анодом, який відділяє прискорюючий проміжок від ПР (рис. 13). При цьому плазмова поверхня, яка емітує іони, розташована поблизу площини анода. Модель представлена

рівняннями (1), (3)-(5), (7)-(14) і враховує відбиття електронів від сітки. На цій моделі досліджувався електронний прискорювач з вторинно-емісійним катодом на напругу 100-400 кВ з наповненням  $N_2$  і  $He$ . Неврахування відбиття швидких атомів від катода і іонізації ними газу дає зменшені значення струмів, що вказує на важливу роль цих частинок і в цих ГрСВЕ.

Була створена модель іонного діода з анодним емітером іонів (ГрСВЕ № 1.2, рис. 14) для імпульсного режиму. Використані рівняння (1), (3)-(5), (7)-(14) для режиму несамостійного розряду в проміжку та додатково (15)-(17) в режимі самостійного розряду. До електродів прикладена напруга  $U$  через баластний резистор  $R$ . Величина  $pd$  задає розрядну моду у проміжку – несамостійний розряд ( $pd < pd_{кр}$ ) або самостійний ( $pd \geq pd_{кр}$ ), де  $pd_{кр}$  – значення, при якому коефіцієнт відтворення електронів на катоді  $k = 1$  згідно (15). На рис. 16 і рис. 17 наведено результати розрахунку змінювання за часом струмів на катоді (електронів  $I_e$ , струму іонів  $I_i$ ) і розрядного струму  $I_p$  для обох розрядних мод в середовищі  $H_2$ , матеріал електродів –  $Cu$ , площа електродів  $S = 100 \text{ см}^2$ , джерело  $E_a = 20 \text{ кВ}$ ,  $R = 1 \text{ МОм}$ ,  $t_{имп}$  – тривалість імпульсу емісії з анода.



**Рис. 16.** Змінювання за часом струмів на катоді іонного діода у несамостійній розрядній моді.



**Рис. 17.** Змінювання за часом струмів на катоді іонного діода у самостійній розрядній моді.

У несамостійній моді після початку емісії іонів струми зростають до стаціонарного значення за час близький до 0,2 мкс, що приблизно відповідає  $14\tau$ , де  $\tau$  – пролітний час іона до катода. Основну частину  $I_p$  (близько 95 %) складає  $I_e$  за рахунок  $\gamma$ -емісії катода. Підйом  $I_e$  в момент  $t = \tau$  викликаний тим, що в цей момент важкі частинки досягають катода і “вмикається” процес  $\gamma$ -емісії. Після вимикання ПР ( $t > t_{имп}$ ) спостерігається експоненційне зменшення струмів. Цю моду можна рекомендувати для імпульсних джерел пучків електронів та іонів з повним керуванням, наприклад, при постійній напрузі на електродах. У самостійній моді сумарний струм  $I_p$  також досягає стаціонарного значення, яке залежить від величини  $j_{i.a}$  (рис. 17). Крива 1 відповідає випадку, коли розряд виникає без ПР (фонові струми змодельовані  $j_{i.a} = 10^{-10} \text{ А/см}^2$ ). Перехідний процес в цьому випадку триває близько 15 мкс або  $1400\tau$ . При збільшенні  $j_{i.a}$  швидше досягається стаціонарний  $I_p$ , причому його величина збільшується. Таким чином, при  $pd \geq pd_{кр}$  розряд в проміжку виникає самостійно, без ПР, але тривалість

встановлення  $I_p$  можна скоротити при емісії іонів з анода. Також можна керувати  $I_p$  шляхом змінювання  $j_{i.a}$ . Цей режим можна рекомендувати для застосування в імпульсних джерелах електронних пучків, наприклад, при подаванні імпульсної напруги на електроди після початку іонної емісії з анода.

**3. У третьому розділі** розглядається високовольтний магніто-керований комутатор струму (МКК) з вторинно-емісійним катодом (ВЕК) і  $H_2$  наповненням для

потужної імпульсної техніки. Комутатор здатний як вмикати струм у високовольтному колі, так і переривати/вимикати струм в умовах збільшення анодної напруги під час вимикання. Принцип роботи МКК пояснює рис. 1. За базову електродну систему взято коаксіально-циліндричний інверсний газомagnetрон із зовнішнім ВЕК. На рис. 18 показане фото одного з варіантів МКК і типові розміри електродів. Циліндрична форма забезпечує замкнутий дрейф електронів у схрещених полях, велику поверхню ВЕК з відносно однорідним розподілом струму на відміну від нормального і планарних magnetронів, а також меншу розрядну напругу і більш просту конструкцію. Для мінімізації екрануючого ефекту катод має розріз по утворюючій, а для стабілізації вмикання МКК використовують додаткову систему ініціювання. Для створення працездатного МКК потрібно було вирішити декілька задач, зокрема, правильно вибрати робочу точку, як на рис. 1б.

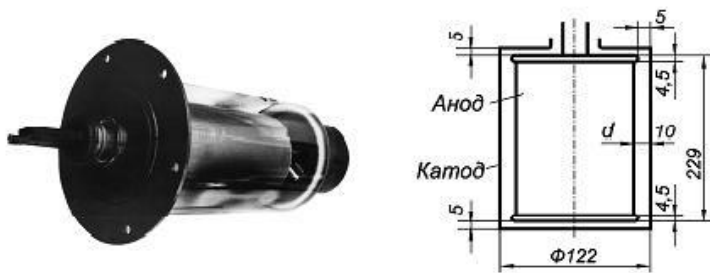


Рис. 18 Зовнішній вид МКК (керувальна котушка знята) і розміри електродів в мм.

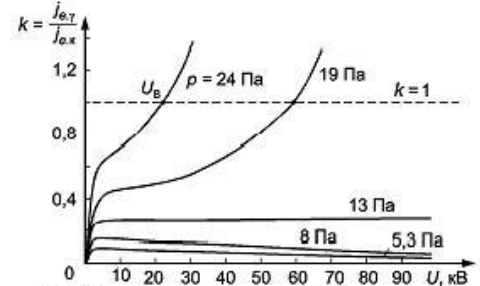
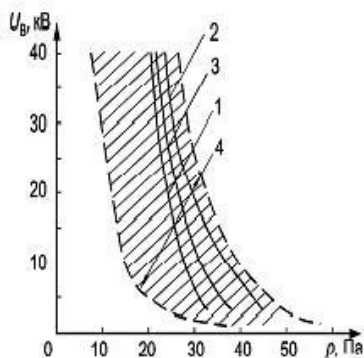


Рис. 19. Залежності коефіцієнта відтворення електронів на катоді від тиску водню і напруги ;  $d = 10$  мм.



Матеріал електродів – сталь 12Х18Н10Т, газ –  $H_2$ ,  $d = 10$  мм

Розрахункові криві: 1 – одностадійний прогрів емітера (10 год. – 800 К), 2 – двостадійний прогрів (10 год. – 800 К, 4 год. – 1500 К), 3 – без прогріву. Заштрихована область 4 – зона експериментальних значень, отриманих на стадії тренування 4-х приладів.

Рис. 20. Характеристики виникнення самостійного розряду (криві Пашена) у водню.

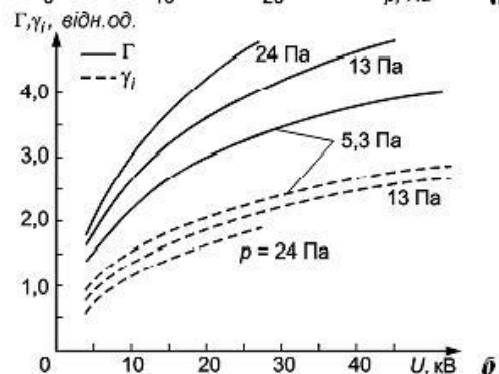
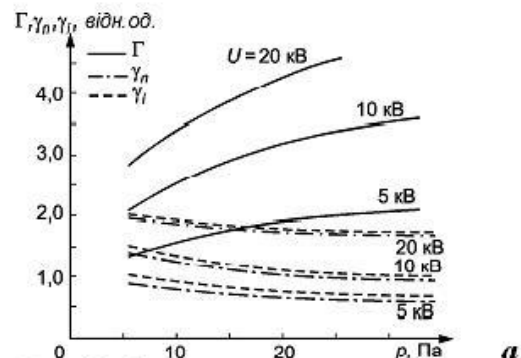


Рис. 21. Залежності інтегральних коефіцієнтів вторинної емісії катода від тиску водню (а) і напруги (б).

Для визначення максимально допустимої величини  $pd$  при заданій напрузі використовується модель ГрСВЕ № 1.4, яка представлена рівняннями (1), (3)-(11), (14) – (17). Рівняння (15) для коефіцієнта відтворення електронів на катоді  $k$  виражає умову втрати електричної міцності. Відповідно, точки на кривих  $k(U)$  з  $k = 1$  на

рис. 19 відповідають точкам кривих Пашена. При  $p \leq 13$  Па самостійний розряд в МКК без магнітного поля неможливий в принципі (знаходимося в області вакуумної ізоляції). На рис. 20 суцільні криві – це розрахункові криві Пашена для різних режимів обробки катода, які враховувалися шляхом використання експериментальних даних по  $\gamma$ -емісії сталі 12Х18Н10Т.

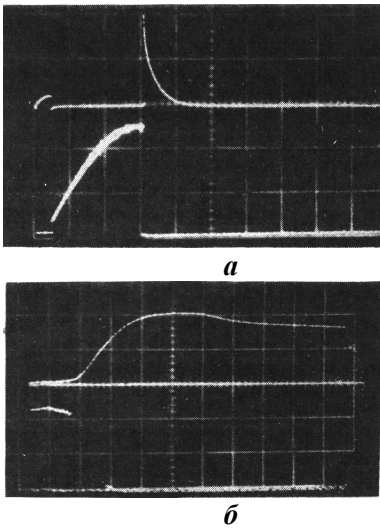
Заштрихована область – зона експериментальних значень електричної міцності, яку отримали при різних режимах технологічного тренування 4-х приладів. Розрахункові криві потрапляють в область підвищених тисків, тобто при правильному виборі технології можна отримати необхідну електричну міцність при максимально можливому тиску водню, а дані розрахунку можуть бути орієнтиром для вибору технології. На рис. 21 представлені розрахункові значення інтегральних значень коефіцієнтів  $\gamma$ -емісії катода при бомбардуванні іонами ( $\gamma_i$ ) і нейтралами ( $\gamma_n$ ) водню, і загальний коефіцієнт  $\Gamma$ , віднесений до іонного струму. Як видно, на передрозрядній стадії їх величина для сталі 12Х18Н10Т становить декілька одиниць.

МКК стабільно працює, тобто без зривів у вакуумно-дуговий розряд і втрати керованості, при густині струму  $j < j_{\text{пр}}$ . Експеримент виявив, що добуток  $j_{\text{пр}} \times \tau$ , який визначає максимальну питому величину комутованого заряду і, відповідно, питому енергію, що розсіюється на катоді під час імпульсу струму, практично незмінний при змінюванні  $\tau$  від 30 до 300 мкс. Отримані значення  $j_{\text{пр}} = 2-15$  А/см<sup>2</sup>. Час переривання при вимиканні магнітного поля  $t_{\text{пр}}$ , протягом якого струм зменшується від рівня 0,9 до рівня 0,1 від амплітуди струму  $I$ , дорівнює декільком мікросекундам; це свідчить, що даний МКК може практично застосовуватися в потужній імпульсній техніці.

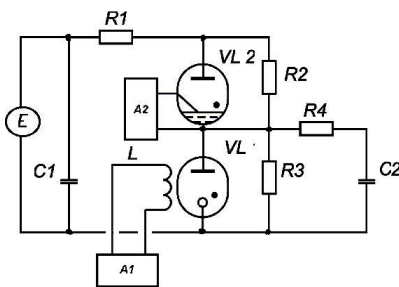
Було досліджено роботу МКК в схемах з ємнісними і індуктивними накопичувачами енергії. Прилади в скляній оболонці з радіаційним охолодженням при роботі з ємнісним накопичувачем в режимі безперервної послідовності імпульсів забезпечували передавання імпульсної (миттєвої) потужності навантаженню  $P_{\text{імп}}$  до 1 МВт при середній потужності  $P_{\text{ср}}$  до 1 кВт. При водяному охолодженні  $P_{\text{імп}}$  досягла 15 МВт при  $P_{\text{ср}}$  до 10 кВт. Подальше підвищення енергетичних параметрів здійснювалося в повторно-короткочасному режимі формування пакетів імпульсів (в адіабатичному режимі без примусового охолодження при частоті імпульсів в пакеті  $F$  до 400 Гц МКК генерував протягом 10-30 с середню потужність  $P_{\text{ср}}$  до 180 кВт;  $U_k = 20$  кВ, навантаження – 20-100 Ом, середня потужність керування до 2 кВт).

Для дослідження роботи МКК з індуктивним накопичувачем енергії (ІНЕ) випробували дві конструкції МКК – діоди-магнетрони і тріод типу тріоплазматрон з катодним екраном-сіткою. Виявили, що тріоплазматрон має значно гірші характеристики, ніж діодні МКК, через стискування розряду в отворах екрана і дугоутворення на ньому у момент вимикання. Площа катода діодів була – 75 см<sup>2</sup>, матеріал – Мо марки МЧ, міжелектродний проміжок  $d = 4, 8$  і 16 мм. Для них максимальні значення струму переривання, при якому вірогідність дуги не більша 0,1, і струму тліючого розряду для накачки ІНЕ, при якому вірогідність дуги не більша 0,1, – лінійно зменшуються із збільшенням тривалості накачування ІНЕ,

скоріше всього, через розігрівання і вибухове руйнування мікронеоднорідностей на поверхні холодного катода.



**Рис. 22.** Осцилограми  $U_H$  (верхні, 10 кВ/под) і струму через МКК (нижні, 90 А/под). Масштаб часу: а – 500 мкс/под; б – 1 мкс/под.



A1, A2 – генератори керувальних імпульсів, C1 – накопичувач, E – джерело енергії, R1 – навантаження, R2-R3 – подільник напруги, L – котушка, VL1 – МКК, VL2 – ігнітрон, R4-C2 – коло для стабільного запуску МКК

**Рис. 23.** Двоприладна схема для переривання струму

струм в навантаженні.

Потужність керування і тривалість переривання  $t_{пр}$  по різному залежать від величини  $d$ . Чим більша  $d$ , тим потрібно менше  $B_B$ ,  $B_B d \approx \text{Const}$  (рис. 1). Проте, при цьому зростають  $t_{пр} \sim d^2$  внаслідок дифузійного механізму деіонізації. Запропоновано виконання міжелектродного проміжку з секцій із різними  $d$ , як на рис. 24. Секція 1 (анод 4) призначена для ініціації і підтримки розряду, а секція 2 (анод 5) з  $d_2 < d_1$  для його переривання і деіонізації. Катод 3 – спільний для обох секцій. Кожна секція має власну котушку (6 і 7).

Діод з  $d = 4$  мм показує набагато кращі комутаційні характеристики. Осцилограми його представлені на рис. 22, з яких виходить, що при генерованій напрузі  $U_H \approx 20$  кВ швидкість його наростання  $dU_H/dt \geq 10$  кВ/мкс, час переривання струму  $t_{пр} = 1 \dots 2$  мкс. При цьому розрядна напруга на приладі в період накачування ІНЕ дорівнює 300-400 В. Отримане значення  $dU_H/dt$  істотно перевищує відомі результати.

Було досліджено шляхи поліпшення характеристик МКК. Апробовано використання дворівневих імпульсів магнітного поля. Цей спосіб оснований на тому, що для виникнення розряду потрібна більш велика  $B$ , ніж для його підтримки, див. рис. 1, в, де  $B_1|_{U_B=U_1} > B_{\min}(U_{\text{п}})$ . Звідси в нетривалий час для вмикання МКК ( $\tau_1 \sim 6$  мкс) створюють поле  $B \geq B_1$  відповідно до верхньої гілки характеристики  $U_B(B_B)$ , а нижня гілка визначає мінімальне поле  $B_{\min}$ , при якому виникає розряд. Для підтримки тривалішого розряду ( $\tau_2 = 50 \dots 200$  мкс  $\gg \tau_1$ ) використовуємо  $B_{\min} \leq B_2 \ll B_1$ . Енергетична

ефективність керування по співвідношенню втрат була більша в 3-5 разів при дворівневих імпульсах. Запропоновано підвищити ефективність дворівневого способу шляхом створення поля  $B_1$  в короткій котушці для ініціації розряду, а поле  $B_2$  – у довгій котушці для комутації струму. Також апробовано зменшення витрат на керування і створення початкової іонізації для зменшення нестабільності вмикання МКК у двоприладовій схемі, представлений на рис. 23. У початковому стані анодна напруга  $U_a = U_{R3} < U_{C1}$  завдяки подільнику R2-R3, але достатня для формування стартового розряду в момент  $t_1$  після вмикання котушки. В момент  $t_2$  вмикають VL2, і генерується потужний імпульс в навантаженні R1. В момент  $t_3$  МКК перериває



Рис. 25 ілюструє принцип роботи МКК, а осцилограми на рис. 26 – імпульси струму. В проміжок часу  $\Delta t$  відбувається перекидання розряду в секцію 2. Тривалість імпульсу  $\tau_2$  має бути такою, щоб встиг деіонізуватися проміжок 1. Для прискорення деіонізації плазми проміж котушками введено перфорований деіонізаційний фільтр 8 з феромагнетику. Якщо не застосовувати другу котушку і гасити розряд в першому проміжку МКК, час переривання  $t_{пр}$  струму 1 кА дорівнює 35 мкс. При роботі з двома котушками  $t_{пр}$  зменшується до 5 мкс. При  $I_a = 300$  А час  $t_{пр} \approx 3$  мкс.

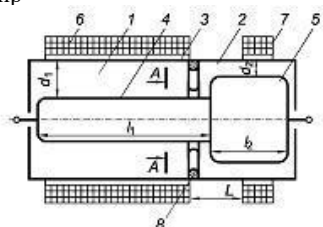


Рис. 24. Схема електродної системи МКК з двосекційним анодом

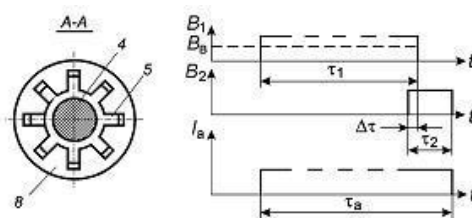


Рис. 25. Імпульси поля котушок 6 ( $\tau_1$ ) і 7 ( $\tau_2$ ) та струму МКК.

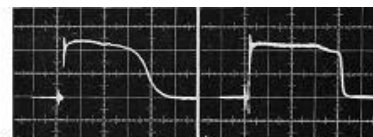


Рис. 26. Осцилограми струму МКК. Ліворуч – працює тільки котушка 6, праворуч – по чергові працюють котушки 6 і 7.

Масштаб – 150 А/под, розгортка – 20 мкс/под.

Запропоновано пакетний принцип формування імпульсів магнітного поля з суперпозицією коротких парціальних імпульсів для отримання довших квазіпрямокутних імпульсів. У разі неподавання парціального імпульсу утворюється пауза поля і короткочасно вимикається струм, що корисно, коли навантаження схильне до іскріння, пробоїв і коротких замикань (електронні та іонні гармати, які працюють в технічному вакуумі і з реакційним газом, установки плазмової іонної імплантації або коронного розряду). При цьому синтезуються квазіпрямокутні імпульси магнітного поля з короткими фронтами і регульованою тривалістю, що

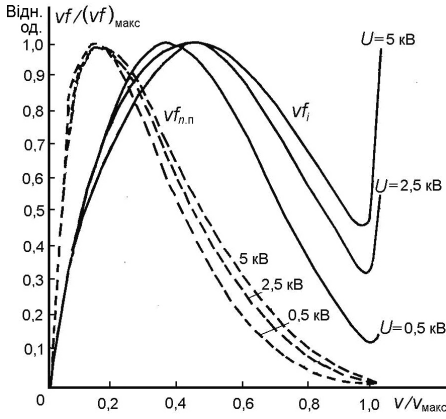
Таблиця 2. Основні параметри комутатора-переривника струму з ВЕК і магнітним керуванням

Найменування параметрів	Значення
Напруга анода, максимальна	15 кВ
Струм анода, який переривається, максимальний	1 кА
Тривалість імпульсу струму	20-200 мкс
Частота повторення імпульсів, максимальна	400 Гц
Тривалість переривання струму	до 5 мкс
Розкид моменту вмикання:	
без системи стабілізуючого підпалу	1 - 20 мкс
із стабілізуючим підпалом	0,05 мкс
Падіння напруги після вмикання	до 600 В
Струм керувальної котушки	до 300 А
Маса (без керувальної котушки)	10 кг

дозволяє відмовитися від неефективних імпульсів напівсинусоїдальної форми.

Перевірка способу здійснювалася при роботі МКК з електронною гарматою на 30 кВ, які були з'єднанні через підвищувальний трансформатор. Робоча напруга МКК – 10 кВ, амплітуда імпульсу струму за відсутності пробоїв в гарматі – 200 А, при пробоях – не більше 1 кА, тривалість імпульсів – 200 мкс. Тривалість парціальних імпульсів – 35 мкс, яка була достатньою для відновлення електричної міцності гармати при неподанні наступного імпульсу. В табл. 2 наведено основні параметри розробленого МКК з ВЕК.

**4. Четвертий розділ** присвячений імпульсним ГрСВЕ для технології конструювання поверхневих структур. Тут вторинні емітери служать джерелом заряджених частинок і речовини, з якого формується продукт. Емісія речовини здійснюється за рахунок кінетичної дії іонів і швидких атомів в розпилювальних



**Рис. 27.** Функції розподілу потоків іонів  $\text{Ag}^+$  (суцільні лінії) і нейтралів перезарядки  $\text{Ag}^0$  (штрихові лінії) на катоді при  $pd_k = 6,6 \text{ Па}\cdot\text{см}$ . Функції нормовані до  $v_{\text{макс}} = \sqrt{2eU / M_i}$ .

системах і/або за рахунок випаровування. Розглядалися розпилювальні системи – діодна (ДРС) на аномальному тліючому розряді (ДРС) і магнетронна (МРС).

Для визначення швидкості осадження моделювали процеси розпилювання емітера (катода-мішені) і масопереносу розпилених частинок через газ до підкладки була створена гібридна модель. До перших процесів застосували кінетичну модель № 3 для ГрСВЕ з плазмовим анодом, яким є плазма негативного світіння з  $\delta$ -емісією іонів  $j_{i,a}$ , див. (1), (3), (5), (7)-(11), (13), (14), (19). На рис. 33 показані розраховані функції розподілу потоків частинок, які бомбардують катод. Також розраховано згідно (14) струм вторинної електронної емісії катода  $j_{e,k}$  для

прив'язки до експерименту з відомою густиною розрядного струму  $j_p = j_{i,a} + j_{e,k}$ .

Розбіжність розрахунку товщини катодного шару  $d_{k,ш}$  з емпіричною формулою Астона була 5...15 %. Для розрахунку густини потоку розпиленої речовини ( $S, S_M$ ) використані наступні співвідношення:  $S = S_M / \rho_k = \mu_k \Phi / \rho_k N$ ,  $S_M = M_k \Phi$ ,  $\Phi = \Phi_i + \Phi_n$ ,  $\Phi_i = \int k(v') f_i(0, v') v' dv'$ ,  $\Phi_n = \int k(v') f_{n,п}(0, v') v' dv'$ , де  $k(v)$  – коефіцієнт розпилення,  $M_k$ ,  $\mu_k$  і  $\rho_k$  – маса атомів, атомна маса в грам-молекулах і щільність матеріалу катода,  $N$  – число Авогадро: У випадку ДРС нейтралі перезарядки  $\text{Ag}^0$  розпилюють у декілька разів більше, ніж іони  $\text{Ag}^+$ . Розрахункова швидкість розпилення, яка враховує тільки вторинну емісію катодних частинок, істотно більша реальної швидкості осадження на підкладку через розсіювання розпилених частинок в газі (тобто через повернення на катод та осадження на бічні стінки); це було враховано при моделюванні процесу масопереносу розпилених частинок через газ за допомогою непереривній моделі, яка є другою частиною гібридній моделі.

Потік розпилених атомів у бік підкладки складається з прямопротітної балістичної частини і дифузійної:  $S_{M,пр} = S_M(0) \exp(-x / \lambda_k) - M_k D_k (dn_k / dx)$ , де  $\lambda_k = (M_k + M_\Gamma) / (M_\Gamma \sigma_k n_\Gamma)$ ,  $M_\Gamma$  і  $n_\Gamma$  – маса і концентрація газових молекул,  $\sigma_k$  – переріз взаємодії катодного атома з газовими молекулами,  $D_k$  – коефіцієнт дифузії атомів катода в газі,  $n_k$  – їх концентрація. Інтегруючи останній вираз з граничною умовою  $n_k|_{x=d_\Pi} = 0$ , де  $d_\Pi$  – відстань катод-підкладка, отримуємо:

$$S_M(x) = M_k D_k n_k|_{x=0} / d_\Pi + S_M(0) (\lambda_k / d_\Pi) [1 - \exp(-d_\Pi / \lambda_k)]. \quad (20)$$

Нехтуючи в типових умовах роботи ДРС першим членом і експонентою в правій частині (20), отримуємо наступний вираз  $D_M = S_M(0) \cdot \lambda_k / d_\Pi$  де  $D_M$  – швидкість осадження розпиленої маси на підкладці. Звідси об'ємна швидкість осадження  $D = S \cdot \lambda_k / d_\Pi$ . Для розпилення Та в Аг ( $U = 5 \text{ кВ}$ ,  $j_p = 0,46 \text{ мА/см}^2$ ,  $d_\Pi = 5 \text{ см}$ ,  $p = 6,6 \text{ Па}$ ,  $T = 573 \text{ К}$ ,  $\lambda_k = 1,87 \text{ см}$ ) величина  $D = 5,8 \text{ Å/с}$ , експеримент дає значення швидкості осадження  $5,4 \text{ Å/с}$ . Таким чином, для розрахунку швидкості



осадження плівок в ДРС необхідно використати кінетичний підхід в наближенні “сильного поля” для визначення характеристик потоку частинок, які бомбардують катод, і враховувати поправку на розсіяння розпиленних частинок в газі.

Для моделювання емісійних процесів і масопереносу в МРС у стаціонарному та імпульсному режимах з різною геометрією поверхні був застосований метод Монте-Карло. Враховувалися розподіли розпиленних атомів за кутами емісії (косинусоїдальний) і за енергіям (Томпсона), зіткнення з молекулами газу з втратою енергії аж до термалізації. Порівняння з експериментом підтвердило адекватність створеної моделі. При малих значеннях  $pd_{\text{п}}$  використовувалася більш проста модель прямопротічних балістичних траєкторій розпиленних атомів. На рис. 28 – рис. 30 приведено дані для дуальної МРС з двох плоских горизонтальних мішеней при різних відстані  $d_{\text{п}}$  плоскої підкладки від мішеней. Жирні лінії на мішенях означають зони емісії розпиленних атомів. Матеріал мішеней – Ti, газ – Ar.

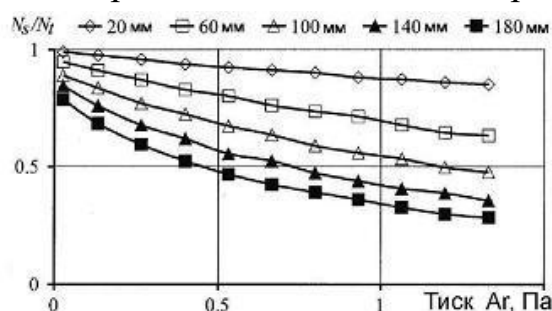


Рис. 28. Доля розпиленних атомів, що досягають підкладки, при різному  $d_{\text{п}}$ .

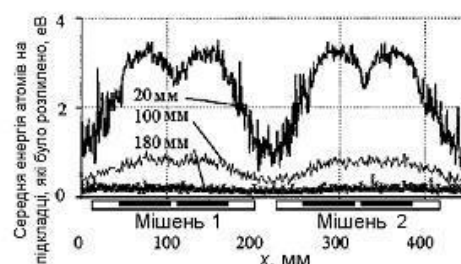


Рис. 29. Середня енергія розпиленних атомів на підкладці при різному  $d_{\text{п}}$  і  $p = 0,745$  Па.

Інерційність масопереносу в імпульсній МРС досліджувалася при різних видах модуляції емісії розпиленних атомів. Рис. 30 ілюструє динаміку при пакетно-імпульсній модуляції (цей режим дозволяє істотно підвищити імпульсну потужність при збереженні значень середньої потужності і теплового навантаження і мінімізувати вірогідність іскріння і дугоутворення). Навіть мала пауза між імпульсами призводить до значної модуляції швидкості осадження (особливо при трикутних імпульсах, які типові при тривалості  $\tau_{\text{имп}} = 10\text{-}50$  мкс). Вихід на “квазістаціонарний” рівень відбувається за десятки-сотні мікросекунд.

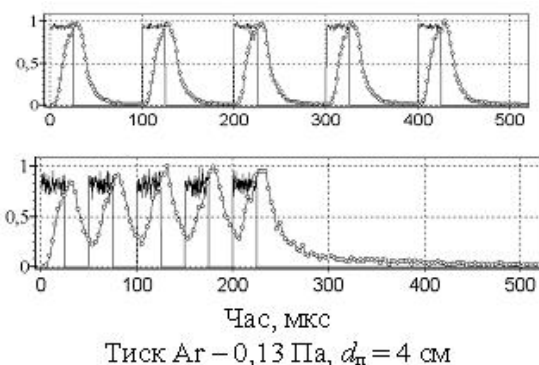


Рис. 30. Динаміка імпульсних процесів розпилення (суцільні криві) і осадження (кружки) атомів Ti в пакетно-імпульсному режимі при різній тривалості паузи між імпульсами в пакетах.

Досліджено МРС для осадження мульти-наношарових композитів Ti-B-C-N покриттів з двох дискових нахилених мішеней складу TiN і  $\text{B}_4\text{C}$ . Їх по черзі розпиляли в середовищі аргону і активованого азоту для осадження десятків пар наночарів і отримання сумарної товщини покриття  $\sim 1$  мкм. Були виготовлені структури  $[\dots\text{nc-TiN}_x/(\alpha\text{-BNO}+\alpha\text{-C})\dots]$ , які складаються з нанокристалічних шарів  $\text{TiN}_x$ , що чергуються з аморфними гексагонально-подібними шарами BNO з вкрапленнями аморфного  $sp^2$ -вуглецю. Формування наночарової структури з аморфними  $\alpha\text{-BCN}$  шарами в покритті на основі TiN призвело до збільшення

нанотвердості в порівнянні з нанотвердістю TiN-покривів – з 25 до 35 ГПа і твердості по Кнупу – з 35 до 52 ГПа. Основний механізм зміцнення – аморфні шари перешкоджають переміщенню дислокацій.

Досліджено MPC для осадження оптичних покриттів з шаруватим і градієнтним змінюванням показника заломлення  $n$  при розпиленні мішеней з різних матеріалів (Si і металу – Ti, Ta, Nb) в аргоновому імпульсному (22 кГц) розряді з поданням активованого кисню. Склад градієнтного покриття – суміш оксидів Si і металу; а співвідношення між їх вмістом в покритті і величина  $n$  змінювалися переміщенням підкладки над мішенями.

Досліджено роботу MPC з різними імпульсними модуляторами. Лампи з пентодною характеристикою імітували генератор/джерело струму з перенапругою в період формування розряду, але з обмеженням максимального значення струму (одиниці-десятки ампер). Транзисторні, таситронні і тиристорні модулятори з малим падінням напруги на ключовому приладі імітували при малому баласті режим генератора/джерела напруги. Режим з великою перенапругою реалізовували приєднанням MPC паралельно до середньочастотного (СЧ) коливального контуру ( $f = 0,44\text{--}1,76$  МГц), який ударно збуджувався за допомогою тиратронного ключа. Запалювали підготовчий розряд (20–50 мА) для початкової іонізації газу між імпульсами. Найбільші відмінності при роботі з різними модуляторами будуть під час розвитку розряду: так у випадку лампових модуляторів фронт розрядного струму дорівнює декільком мікросекундам завдяки перенапруженню на розряді. У випадку відносно низьковольтних транзисторних модуляторів потужний розряд формувався за 50–100 мкс, тому короткі імпульси струму мають трикутну форму. Амплітуда може досягати сотні ампер. На рис. 31 представлено осцилограми

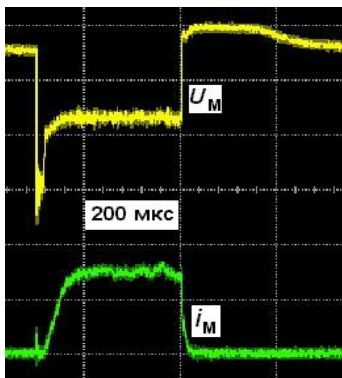


Рис. 31. Осцилограми роботи MPC з транзисторним модулятором.

напруги і струму MPC при роботі з транзисторним модулятором (амплітуда струму 7 А при напрузі 380 В, мішень – Ti, газ – Ar, підтримувався підготовчий розряд).

Відомо, що короткі імпульси забезпечують бездугову роботу MPC, але при цьому швидкість розпилення зменшується через неповністю сформований розряд і зменшений іонний струм на катоді. Так, для Al при  $\tau_{\text{имп}} \sim 100$  мкс швидкість на 30 % менша ніж при  $\tau_{\text{имп}} \sim 1$  мс при тій же середній потужності розряду  $P_c$ . Відзначимо, що доля електронного струму на катоді на фронті збільшена через збільшену  $\gamma$ -емісію.

Досліджувалася робота з реакційним газом на прикладі розпилення Ti в середовищі  $\text{Ar} + \text{CH}_4$  на установці Z550M, оснащений транзисторним модулятором. При тій же  $P_c$  доля Ti в плівці зменшувалася при зменшуванні  $\tau_{\text{имп}}$  і підвищувалася доля C. При  $\tau_{\text{имп}} \leq 50$  мкс і потоках  $\text{CH}_4/\text{Ti} > 1$  отримували 2–5 % Ti, що практично неможливо в режимі постійного струму через безперервні дуги. Роль процесів на фронті та вплив збільшеної  $\gamma$ -емісії і, відповідно, потоку високоенергетичних електронів, який формується в прикатодній області і розкладає  $\text{CH}_4$ , зростають при збільшенні частоти повторювання імпульсів  $F$ . А збільшувати  $F$  потрібно для отримання заданих  $P_c$  і швидкості осадження.



оптимальній затримці імпульсів в пакеті досягається найбільша ефективність іонізації пари. Параметри процесу для термоіонного нанесення плівок Al: пакети збудження індуктора склалися з 3-х імпульсів (див. рис 32):  $f = 880$  кГц,  $F = 2$  кГц,  $t_1 = 14$  мкс,  $t_2 = 10$  мкс,  $E_1 = 2,5$  кВ, потужність електронної гармати – 2,5 кВт. В результаті дії одного пакета на підкладку переносився іонний заряд  $1,6 \cdot 10^{-7}$  Кл/см<sup>2</sup>, який створював густину струму  $J_c = 0,32$  мА/см<sup>2</sup>. Були отримані на підкладці з окисленого Si плівки Al з розміром зерна близько 2 мкм при товщині 1 мкм. Застосування ГУЗ дозволило на порядок зменшити робочу частоту (з 13,56 МГц до меншої 1 МГц) і спростило установку. Імпульсне іонне бомбардування зменшує рівноважну температуру Si підкладки на 40° у порівнянні з безперервним бомбардуванням при рівних значеннях середньої питомої потужності іонного потоку  $P_{\text{ср.пит}}$  на теплоізолювану підкладку в діапазоні  $P_{\text{ср.пит}} = 10\text{-}60$  мВт/см<sup>2</sup>. Ефект можна пояснити більшим нагрівом поверхні підкладки з низькою теплопровідністю під час іонного імпульсу і її інтенсивнішим охолодженням за рахунок теплового випромінювання. Подібний спосіб був застосований для металізації кремнієвих підкладок і поліімідних носіїв для безкорпусного складання інтегральних схем. Він

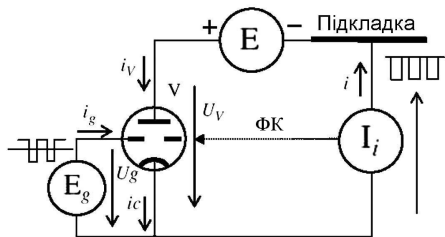


Рис. 35. Схема подавання імпульсної напруги на підкладку

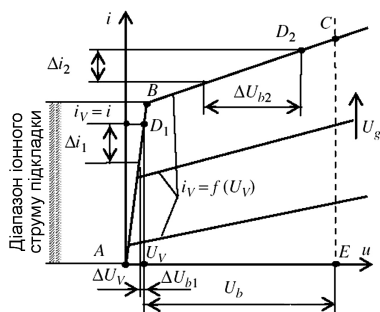


Рис. 36. Робоча діаграма імпульсного модулятора на ЕВП

також використовувався для реакційного термоіонного осадження плівок Al в середовищі активованого в індукційному розряді кисню для нанесення конденсатів з сильно розвиненою пористою поверхнею.

Для подавання напруги зміщення кіловольтної величини на підкладку в потужних високовольтних термоіонних установках потрібний модулятор, який витримує значні флуктуації іонного струму та навіть к.з. і випадкові викиди напруги до 10-20 кВ на підкладці, а також забезпечує її гальванічну розв'язку від керувального кола. Модулятор повинен мати характеристику генератора напруги, щоб флуктуації струму не викликали значних коливань напруги зміщення, але тільки до певного критичного значення струму ( $I_{\text{кр}}$ ), вище за яке модулятор повинен автоматично припиняти подавання напруги,

щоб запобігти к.з. або перервати дугу на підкладці. Для отримання таких характеристик запропоновано взяти електронно-вакуумний прилад-комутатор (ЕВП) з двома анодами, один з яких додатково виконує функцію керувальної сітки. Такі функції можуть виконувати електровакуумні тріоди з потужною сіткою, які призначені для роботи в потужних генераторах з позитивною сіткою (лампи серії ГУ). На рис. 35 представлена спрощена еквівалентна схема розробленого модулятора, а на рис. 36 – його робоча діаграма. Джерело  $E_g$  задає параметри модуляції ( $\tau_{\text{імп}}$ ,  $F$  і  $I_{\text{кр}}$ ) у анодному колі тріода V. Генератор струму  $I_i$  імітує плазмовий емітер іонів, емісія якого задає анодний струм тріода  $i_v = i$  і напруги на тріоді і підкладці  $U_b = E - U_v$  через функціональність керування (ФК). Ділянка AB – робоча (на ній сітка відіграє роль поглиначка “зайвих” для анодного кола катодних електронів,  $i_g = i_c - i_v$ ), точка B задає  $I_{\text{кр}}$ , BC – ділянка захисту підкладки і гасіння

дуги. Відношення  $K_E = U_b/E$  визначає коефіцієнт використання напруги джерела  $E$ . Для ламп серії ГУ  $K_E \geq 0,9$ . Розроблено імпульсні модулятори з параметрами  $U_b = 2-6$  кВ,  $i \leq 10$  А,  $U_g = 220$  В,  $D = 0,1-0,9$ ,  $F = 0,1-10$  кГц на базі 3-х і 4-х паралельно з'єднаних тріодів ГУ-22А, працюючих в режимі з частковим поверненням електронів на сітку в термоіонних установках з електронно-променевим випаруванням (ЕПВ) і іонізацією пари в низьковольтовому дуговому розряді для осадження покриттів з імпульсним іонним бомбардуванням.

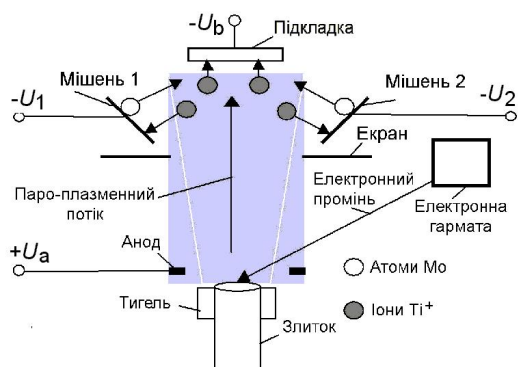


Рис. 37. Схема іонно-плазмової випарно-розпилювальної системи

Запропоновано і досліджено випарно-розпилювальну систему з двома типами вторинних емітерів – плазмовим емітером іонів випаровуваної речовини і емітером атомів речовини мішені або двох емітерів атомів двох мішеней (рис. 37). При цьому іони з плазмового емітера розпилюють атоми твердотільних емітерів. Така система корисна, коли покриття містять як легко випаровувальні компоненти (Ti, Zr, V, Al), так і тугоплавкі (Mo, W), зокрема, зі сплавів Ti-8Al-1V-1Mo, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-

6Al-2Sn-4Zr-6Mo, які наносять термоіонним методом на лопатки газотурбінних двигунів в процесі їх ремонту. Подібний підхід був апробований з ЕПВ Ti і сплаву Ti-8Al-1V-1Mo і іонізацією пари і розпиленням іонами  $Ti^+$  мішені з Mo. В першому випадку вміст Mo в покритті був 0,5 %, в другому – 2 %.

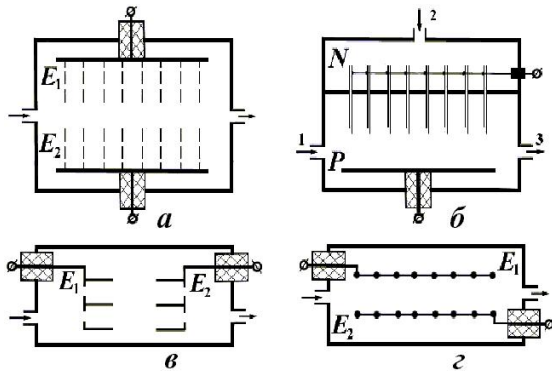
Досліджено комбінований процес нанесення на турбінні лопатки термобар'єрних покриттів з періодичною мікрошаруватою структурою і зменшеною теплопровідністю. Тут YSZ-кераміка ( $ZrO_2 + 7\% Y$ ) випарується електронним променем, а пара і добавка  $O_2$  іонізуються в індукційному ВЧ розряді з формуванням вторинного емітера іонів. Густина струму емісії 0,5-2,5 мА/см<sup>2</sup>. Іони бомбардують підкладку в пакетно-імпульсному режимі і формують періодичну мікроструктуру. Розбиття пакетів на парціальні імпульси запобігає дугоутворенню на підкладці. Теплопровідність покриття за даним методом була меншою теплопровідності покриття без іонного бомбардування на 15-20 %, тобто 1,5-1,6 Вт/(м·К). Зменшення теплопровідності шаруватої мікроструктури можна пояснити розсіюванням фононів на неоднорідностях між мікрошарами. Така технологія корисна для підвищення ефективності газотурбінних двигунів.

**5. У п'ятому розділі** представлено результати прикладних досліджень ГрСВЕ атмосферного тиску для озонової і біомедичної апаратури. Робота при такому тиску істотно спрощує апаратуру (не потрібні вакуумні насоси) і пристрої для її застосування. Для досліджень і розробок вибрано безструмерний коронний розряд постійного струму з локалізованою зоною іонізації (світними точками на електродах), виходячи з вимог отримання концентрації озону до 1 г/м<sup>3</sup>, максимального спрощення конструкції електродів і надійної довгострокової роботи. Досліджувалися вольт-амперні характеристики (ВАХ) для вибору систем з мінімальною робочою напругою, вплив геометрії електродів з малим радіусом кривизни поверхні на ефективність і відтворюваність генерації  $O_3$  в процесі

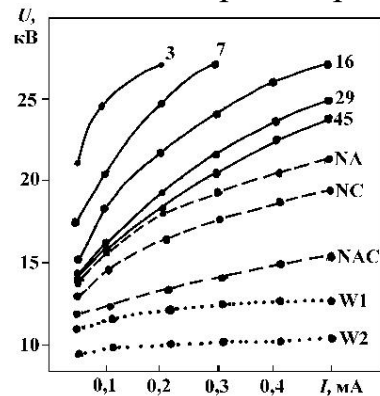


короткочасної і довготривалої експлуатації. Розроблено озонотерапевтичний апарат АК-4М та іншу біомедичну озонову апаратуру. Була розроблена математична модель озонатора. Представлені результати біомедичних випробувань апаратури.

На рис. 38 показано конфігурації використовуваних електродних систем, а на рис. 39 – типові ВАХ. Одночасне незв'язане існування численних світних плям (локалізованої корони) на вторинно-емісійних катодах усіх конфігурацій дозволяє розглядати досліджуваний розряд як мульти-коронний. При цьому плоскі і дрітняні аноди покривалися рівномірним світловим шаром при підвищенні струму. На анодах з голок спостерігалось світіння на кінчиках голок. Таким чином, в даних системах мав місце уніполярний (анодний або катодний) і біполярний мульти-коронний розряд. Позитивний нахил ВАХ безстримерної корони сприяв паралельному існуванню численних парціальних коронних розрядів і відносно рівномірному навантаженню розрядним струмом електродних поверхонь. Збільшення кількості електродних голок і ниток призводило до зниження розрядної напруги  $U$ . Напруга також знижувалась при переході до біполярної корони.



**Рис. 38.** Системи для мульти-коронного розряду:  $E_{1,2}$  – електроди (католи і аноди),  $N$  – католи у вигляді порожнистих голок,  $P$  – плоский анод; а-в – системи з голками (а – 91 шт., б – 45 шт.), г – система з  $W$  дрітми ( $\varnothing 0,1$  мм). Стрілки – напрямки потоку  $O_2$ .

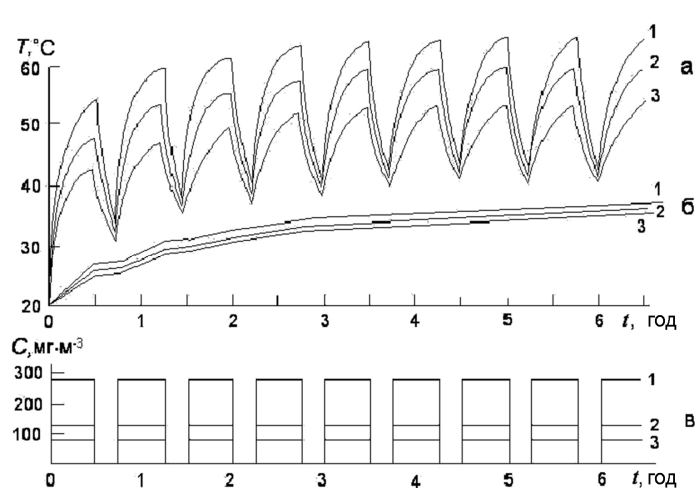


**Рис. 39.** ВАХ мульти-коронного розряду: суцільні лінії – рис. 44, б, штрихові – рис. 44, а, пунктирні – рис. 38, г. Потік  $O_2$  ( $Q$ ) – 1 л/хв. Числа – кількість порожнистих голок (рис. 38, б);  $NA$  – голки на аноді,  $NC$  – голки на катоді,  $NAC$  – голки на аноді і катоді (рис. 38, а);  $W1$  – 13 дрітів,  $W2$  – 25 дрітів (рис. 44, г).

Зменшення відстані між електродами призводило до зменшення  $U$ , але одночасно до підвищення ймовірності утворення стримерів та іскрових пробойів. При вибраних відстанях і струмі до 1 мА іскрові пробої були рідкісними, але за 1000 робочих годин іскрова ерозія електродних голок зі сталі Х18Н10Т в середовищі  $O_2$  зменшувала їх довжину приблизно на 1 мм, що збільшувало  $U$ . Режим стабілізації струму нівелював цей ефект, і змінювання струму не перевищували 3 %.

Досліджувався вплив геометрії електродів і робочих умов на ефективність генерації озону  $O_3$ . Було виявлено, що при будь-якій геометрії концентрація  $O_3$  пропорційна розрядному струму; збільшення потоку  $O_2$  призводить до зменшення концентрації  $S$ . Порівняння подавання  $O_2$  через порожнисті голки (вхід 2 на рис. 38, б) і повз них (вхід 1 на рис. 38, б) не виявило суттєвої різниці в концентрації  $O_3$ . Важливо відзначити, що різниця в  $S$  для усіх вивчених систем невелика (не більша 30 %). Тому при виборі електродної системи для озонотерапевтичного апарата ми виходили з техніко-економічних міркувань.

Для апарата “Активатор кисню” типа АК-4М була вибрана біполярна система з голками уздовж потоку газу (рис. 38, в). На рис. 41 представлена схема апарата, на рис. 40 і рис. 42 представлені його характеристики. Електроди озонатора – сітчасті диски з голками. Кількість голок вибрано за результатами дослідження впливу їх кількості на величину  $C$ . На  $C$  також впливають безліч інших чинників, і забезпечення стабільності параметрів озонатора під час експлуатації є важливим. В першу чергу стабілізовано потік газу і струм через озонатор. Відомо, що  $O_3$

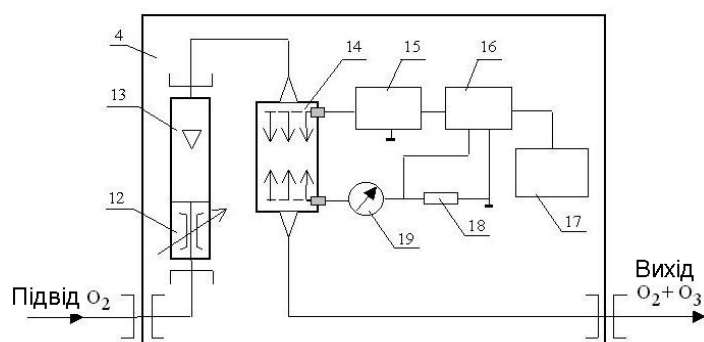


**Рис. 40.** Зміна температури оболонки (скляної колби) озонатора (а), повітряного середовища усередині кожуха апарату АК-4М (б) і концентрації озону (в) протягом робочого дня:  $I = 300$  мкА; потік кисню  $Q$ : криві 1 – 1 л/хв; криві 2 – 3 л/хв; криві 3 – 6 л/хв.

чутливий до нагрівання, тому було досліджено вплив теплового режиму роботи озонатора. На рис. 40 показано змінювання температури оболонки озонатора і повітря всередині кожуха апарата протягом 8 годин в циклічному режимі. Незважаючи на циклічне підвищення температури на десятки градусів концентрація  $O_3$  в межах похибки вимірів не змінювалася протягом 8 годин, що вказує на слабку взаємодію озону з голчастими електродами коронного розряду і оболонкою. Випробування трьох зразків озонаторів підтвердили довготривалу відтворюваність генерації  $O_3$  протягом 1000 годин. У той же час

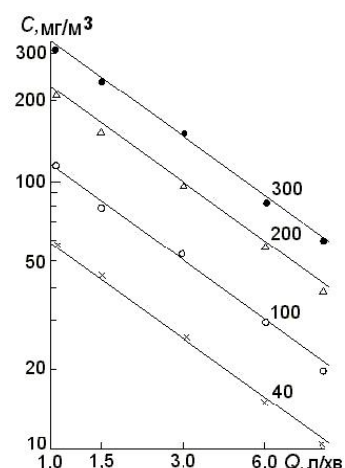
мало місце змінювання розрядної напруги як протягом перших десятків хвилин після вмикання, так і в процесі тривалої експлуатації. Перші змінювання, мабуть, пов'язані з флуктуаціями емісійних властивостей катодних голок, а довготривалі – з ерозією електродів. Однак це не впливало на концентрацію  $O_3$  завдяки стабільності розрядного струму. Обробка експериментальних даних з використанням методики регресійного аналізу дозволила побудувати апроксимаційну математичну модель озонатора для апарату АК-4М у вигляді  $C = 1,15 \cdot I \cdot Q^{0,7314}$ , де  $C$  в  $mg/m^3$ ,  $I$  в мкА,  $Q$  в л/хв. Зіставлення апроксимації з експериментом для одного із зразків озонатора показано на рис. 49. Похибка даної апроксимації для серії озонаторів не перевищує 30 % в діапазоні значень потоку кисню 1...10 л/хв і 10 % в діапазоні 3...10 л/хв.

Розробку апарата “Активатор кисню” АК-4М виконано відповідно до медико-технічних вимог, затверджених МОЗ України. Параметри апарата наведено в табл. 3. Апарат АК-4М – універсальний за своїм призначенням, але в першу чергу він призначений для проведення лікувальних процедур методом газзації (обробки активованим киснем зовнішніх частин тіла пацієнта в ізольованому об'ємі – лікувальної камері-ізоляторі). Друге типове застосування апарата – озонування рідких речовин, а також антибактеріальна і антигрибкова обробка ізольованих приміщень та дезодорування і створення атмосфери з вмістом озону в боксах зберігання предметів після деконтамінації і знежирення поверхні.



12 – регулятор потоку газу, 13 – ротаметр, 14 – озонатор на безструмерному мульти-коронному розряді, 15 – високовольтне джерело живлення, 16 – регулятор напруги, 17 – таймер і блок керування, 18 – резистор зворотного зв'язку для стабілізації розрядного струму, 19 – мікроамперметр

**Рис. 41.** Структурна схема електронного блоку апарату “Активатор кисню” АК-4М:



**Рис. 42.** Залежність концентрації озону від величини потоку кисню для апарату АК-4М. Числа на полі рисунка – розрядний струм в мікроамперах.

Була виконана різнобічна біомедична апробація створеної апаратури. Спільно з кафедрою хірургічної стоматології та щелепно-лицевої хірургії (НМУ ім. А.А. Богомольця, м. Київ) вивчався вплив озону на процес регенерації кісткової тканини у щурів *Vistar* і було виявлено, що в групі “озон-плюс” на 15-й день достовірно частіше, ніж в групі “озон-мінус” спостерігалось заміщення штучно зробленого дефекту нижньої щелепи і стегна більш зрілим кістковим регенератом, а процес репаративної регенерації рідше ускладнювався остеомієлітом. Клінічні дослідження,

**Таблиця 3.** Основні параметри озонотерапевтичного апарату АК-4М

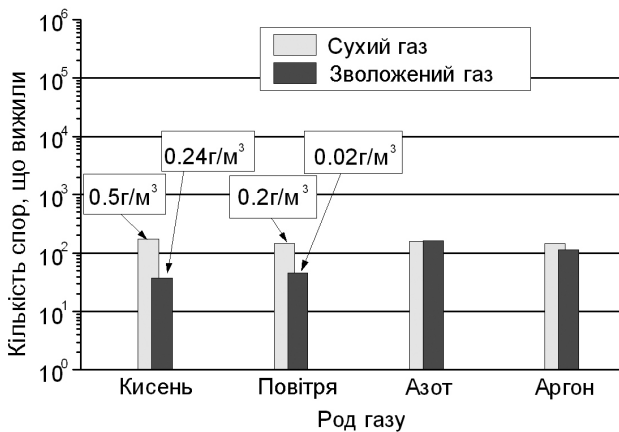
Найменування параметрів	Значення параметра
<b>Газові параметри</b>	
Надмірний тиск кисню на вході, МПа	0,25-0,8
Витрати кисню, $\text{дм}^3/\text{с}$ (л/хв)	0,017-0,17 (1-10)
Масова концентрація $\text{O}_3$ на виході, $\text{г}/\text{м}^3$	0,02-0,2
<b>Експлуатаційні параметри</b>	
Діапазон завдання часу процедури, хв	3-30
Потужність споживання, Вт	не більше 70
Електробезпека по ГОСТ 12.2.025-76	клас I, тип В
Середнє напрацювання на відмову, год.	не менше 3000
Середній термін служби, років	не менше 5
Кліматичне виконання	УХЛ 4.2
<b>Масо-габаритні параметри</b>	
Маса електронного блоку, кг.	не більше 12,5
Габарити електронного блоку, мм	185×330×520

виконані на лікувальній базі НМУ ім. А.А. Богомольця (м. Київ, кафедри факультетської хірургії № 1 та хірургічної стоматології та щелепно-лицевої хірургії), УНДІ дерматології і венерології (м. Харків) показали, що озонотерапія з використанням створеної апаратури є ефективним і недорогим методом лікування для великого контингенту хірургічних і дерматологічних хворих.

Були проведені порівняльні дослідження впливу на спори бактерій *Bac. Stearothermophilus* в різних розрядах: мульти-коронному розряді, іскровому і бар'єрному. Розряди створювали в одній і тій же скляній камері. На зразки з нержавіючої сталі наносилися спори в кількості близько  $8.6 \cdot 10^5$  при поверхневій щільності близькій до  $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ . Зразки розміщувалися поруч з електродами. Наносилися чисті спори і з білково-сольовою добавкою – БСД (10 % білка плюс 0.65 % NaCl). На рис. 43 наведені результати для



різних газів і вплив зволоження.  $P_{\text{пит}}$  – потужність розряду, яка віднесена до об'єму камери. У випадку БСД кількість спор, що вижили було в 2-3 разі більше.



**Рис. 43.** Виживання спор без БСД при безстримерному коронному розряді в середовищі різних газів.  $P_{\text{пит}} = 1.5 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>3</sup>. На полі рисунка вказана концентрація озону.

всіх розрядів через утворення, наприклад, у вологому повітрі і кисні  $O_3$ ,  $OH$ ,  $H_2O_2$ , аерозолів азотної і азотистої кислот та інших речовин. У сухому повітрі діють  $O_3$  і  $NO_x$ .

## Висновки

В дисертації розроблено теоретичний базис для моделювання фізичних процесів, проведено аналізування газорозрядних систем з вторинними емітерами і рухом частинок в режимі сильного поля, а також представлені результати експериментальних досліджень і розробки систем для комутуючої, технологічної та біомедичної апаратури.

1. Удосконалено теоретичну модель газорозрядних систем на основі вторинних емітерів для режиму сильного поля при малих  $pd$  шляхом урахування додатково до іонізації газу катодними електронами і частинками, утвореними в міжелектродному проміжку, іонізації частинками, відбитими як від позитивного, так і негативного електродів, що уточнило аналізування і моделювання фізичного механізму газового розряду з вторинними емітерами і забезпечило узгодження теорії з експериментом. Похибка комп'ютерного моделювання в більшості випадків була близькою до 10 %. Це дозволяє розраховувати параметри систем з твердотільними і плазмовими емітерами на етапі автоматизованого проектування з наступною їх промисловою реалізацією.

2. На базі системи з вторинно-емісійним катодом, що використовує надщільний тліючий розряд магнетронного типу, розроблено і реалізовано високовольтний комутатор-переривник струму з холодним катодом, який успішно застосовується в потужних імпульсних модуляторах з ємнісним та індуктивним накопичувачами енергії, що істотно спрощує схемотехніку і поліпшує енергетичні параметри створюваної електрофізичної апаратури. В конструкції комутатора реалізовані нові підходи до зниження потужності магнітного керування.

3. Створені і досліджені на базі газорозрядних систем з твердотільними і плазовими вторинними емітерами нові імпульсні термоіонні і магнетронні пристрої для осадження покриттів і тонких плівок, що дозволило реалізувати нові перспективні технології конструювання поверхневих структур, які успішно застосовуються в мікроелектроніці, оптиці і машинобудуванні.

4. На базі мульти-коронного розряду атмосферного тиску з вторинно-емісійним катодом розроблено і реалізовано нову озонову біомедичну апаратуру, що забезпечило клінічні дослідження і успішні застосування озонотерапевтичних процедур, а також успішні біологічні експерименти із застосуванням озону.

Таким чином, розв'язано важливу науково-прикладну проблему розробки наукових і технічних основ побудови і практичного використання газорозрядних систем на основі вторинних емітерів частинок для комутуючої, технологічної та біомедичної апаратури з поліпшеними показниками.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в розробках нових високоефективних газорозрядних систем з вторинними емітерами частинок для електронної апаратури різного призначення і для розвитку електронної та машинобудівної промисловості України.

### **Список выбранных опубликованных работ за темою дисертации:**

1. Кузьмичёв А.И. Плазменные эмиттеры источников заряженных и нейтральных частиц / А.И. Кузьмичёв, Н.А. Бабинов, А.А. Лисенков. – Киев: Аверс, 2016. 181 с. – ISBN 978-966-8777-10-3.
2. Вольпян О.Д. Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв. – Киев: Аверс, 2012. 360 с. – ISBN 966-8934-23-7.
3. Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы / А.И. Кузьмичёв. – Киев: Аверс, 2008. 244 с. – ISBN 966-8934-07-5.
4. Болдасов В.С. Моделирование газоразрядных коммутрующих приборов низкого давления. Электрическая прочность приборов в предразрядный период / В.С. Болдасов, С.В. Денбовецкий, А.И. Кузьмичёв. – Киев: ИСМО, 1996. 140 с. - ISBN 5-7763-9411-2.
5. Kuzmichev A. Evaporators with Induction Heating and Their Applications. Chapter 13 / A. Kuzmichev, L. Tsybulsky. – P. 269-302. – In *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*. – Publisher: InTech, 2011 – 752 p. – ISBN: 978-953-307-522-8. DOI:10.5772/562 (Web of Science).
6. Кузьмичёв А.И. Магнетронное осаждение покрытий / А.И. Кузьмичёв, А.В. Демчишин. – В энциклопедическом издании в 2-х томах “Неорганическое материаловедение. Материалы и технологии”. – Киев, Наукова Думка. 2008. – Т. 2, кн. 1. С. 575-586. – ISBN 978-966-00-0631-7; ISBN 978-966-00-0744-4 (т. 2).
7. Kuzmichev A. Simulation of the sputtered atom transport during a pulse deposition process in single- and dual-magnetron systems/ A. Kuzmichev, I. Goncharuk // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2003. – Vol. 31. – No. 5, – P. 994-1000. DOI:10.1109/TPS.2003.818451 (SCOPUS).
8. Frank K. Mechanism for initiation of pseudospark discharge by ions ejected from the anode side / K. Frank, Yu.D. Korolev, A.I. Kuzmichev // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2002. – Vol. 30. – No. 1. – P. 357-362. DOI:10.1109/TPS.2002.1003880 (SCOPUS).

9. Kuzmichev A. Features of pulse substrate bias voltage generation with electron tubes / A. Kuzmichev // Vacuum. – 2007. – Vol. 81 – No. 10. – P. 1328-1331. DOI:10.1016/j.vacuum.2007.01.047 (SCOPUS).
10. Kuzmichev A. Impact excitation of MF magnetron discharge for PVD processes / A. Kuzmichev, O. Bevza, H. Steffen, R. Hippler // Vacuum. – 2005. – Vol. 78. – No. 2-4. – P. 611-615. DOI:10.1016/j.vacuum.2005.01.095 (SCOPUS).
11. Kuzmichev A. Investigation of a pulsed magnetron sputtering discharge with a vacuum pentode modulator power supply / A. Kuzmichev, S. Sidorenko, H. Steffen, R. Hippler, V. Kulikovsky // Vacuum. – 2004. – Vol. 72. – No. 1. – P. 59-69. DOI:10.1016/S0042-207X(03)00100-3 (SCOPUS).
12. Kulikovsky V. Composition of Ti-C:H films obtained by pulsed and continuous magnetron sputtering / V. Kulikovsky, A.I. Kuzmichev, P. Bohac, Z. Hubicka, K. Jurek, L. Jastrabik // Surface and Coating Technology. – 2005. – Vol. 200. – No. 1-4. – P. 620-624. DOI:10.1016/j.surfcoat.2005.02.130 (SCOPUS).
13. Shvartsburg A.B, Nanogradient all-dielectric films: technology of fabrication and the first experiments / A.B. Shvartsburg, Yu.A. Obod, A.I. Kuzmichev, O.D. Volpian, Yu.N. Parkhomenko // Optical Materials Express. – 2014. – Vol. 4. – No. 11. – P. 2250-2261. DOI:10.1364/OME.4.002250 (SCOPUS).
14. Volpian O.D. Magnetron Technology of Production of Gradient Optical Coatings / O.D. Volpian and A.I. Kuzmichev, Yu.A. Obod // Inorganic Materials: Applied Research. – 2015. – Vol. 6. – No. 3. – P. 234-239. DOI: 10.1134/S2075113315030132 (SCOPUS).
15. Volpian O.D. Nanogradient Optical Coatings / O.D. Volpian, A.I. Kuzmichev // Russian Journal of General Chemistry. – 2013. – Vol. 83. – No. 11. – P. 2182–2194. DOI: 10.1134/S1070363213110388 (SCOPUS).
16. Skriskii P.L. Structural and mechanical properties of TiN/BCN coatings / P.L. Skriskii, A.I. Kuzmichev, V.I. Ivashchenko, L.A. Ivashchenko, I.I. Timofeeva, O.O. Butenko, O.Y. Khizhun, S.N. Dub // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – V. 52. – No. 1. – P. 73-82. DOI:10.1007/s11106-013-9497-7 (SCOPUS).
17. Boldasov V.S. Nitrogen gas-discharge electron source with secondary-emission cathode / V.S. Boldasov, A.I. Kuzmichev, D.S. Fillipychev, A.Yu. Shabarov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1994. – Vol. 37. – No. 4. – P. 319-325. DOI: 10.1007/BF01046033 (SCOPUS).
18. Boldasov V.S. Electrical field in cathode layer of anomalous glow discharge / V.S. Boldasov, A.I. Kuzmichev // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1992. – Vol. 35. – No. 3-4. – P. 240-242. DOI: 10.1007/BF01038034 (SCOPUS).
19. Boldasov V.S. Physical processes in a low pressure non-self-sustaining high voltage discharge / V.S. Boldasov, A.I. Kuzmichev // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1989. – Vol. 32. – No. 7. – P. 651-658. DOI: 10.1007/BF01058133 (SCOPUS).
20. Boldasov V.S. A low-pressure, non-self-maintained, high-voltage discharge / V.S. Boldasov, A.I. Kuzmichev, D.S. Fillipychev // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1984. – Vol. 27. – No. 7. – P. 656-663. DOI: 10.1007/BF01041829 (SCOPUS).
21. Болдасов В.С. Роль быстрых тяжелых частиц, отраженных от катода, в поддержании высоковольтного разряда / В.С. Болдасов, А.И. Кузьмичёв // Журнал технической физики. – 1983. – Т.53. – Вып. 6. – С. 1235-1237. (Web of Science).
22. Кузьмичев А.И. Характеристики импульсного магнетронного разряда при питании от емкостного накопителя энергии / А.И. Кузьмичев, Ю.И. Мельник, В.Ю. Куликовский, П. Богач, Л. Ястрабик // Известия Академии наук. Сер. Физическая. – 2003. – Т. 67. – № 9. – С. 1272-1278 (SCOPUS).

23. Кузьмичев А.И. Динамические характеристики импульсной магнетронной распылительной системы / А.И. Кузьмичев, В.Ю. Куликовский, С.Б. Сидоренко // Известия Академии наук. Сер. Физическая. – 2000. – Т.64 – № 7. – С. 1317-1321 (SCOPUS).
24. Крижановский В.И. Воспроизводимость генерации озона в коронном разряде с острыми электродами / В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичев // Известия Академии наук. Сер. Физическая. – 2000. – Т. 64. – № 7. – С. 1302-1306 (SCOPUS).
25. Денбовецкий С.В. Запаздывание возникновения разряда в импульсных магнетронных распылительных устройствах / С.В. Денбовецкий, Р. Хипплер, А.И. Кузьмичев, В.Ю. Куликовский, С.У. Нисимов, С.Б. Сидоренко // Электроника и связь. – 2000. – № 8 (т. 2). – С. 195-198.
26. Boldasov V.S. Characteristics of a gas-filled diode with a plasma ion emitter /V.S. Boldasov, A.I. Kuzmichev, A.Yu. Shabarov // High Temperature (Teplofizika Vysokikh Temperatur). – 1991. – Vol. 29. – No. 3. P. 324-328. (SCOPUS).
27. Boldasov V.S. Transient processes in high-voltage low-pressure gas discharge systems / V.S. Boldasov, Ye.A. Zhelubenzov, A.I. Kuzmichev // Sov. Journ. of Commun. Technol. and Electronics.– 1990. – Vol. 35. – No. 11. – P. 128-132. (SCOPUS).
28. Boldasov V.S. Physical processes in a low-pressure diode in the presence of a high cathode emission current density / V.S. Boldasov, Ye.A. Zhelubenzov, A.I. Kuzmichev // Sov. Journ. of Commun. Technol. and Electronics.– 1989. – Vol. 34. – No. 5. – P. 6-12. (SCOPUS).
29. Boldasov V.S. Characteristics of hot-cathode diode at low helium pressure / V.S. Boldasov, A.I. Kuzmichev, D.A. Kuzmichev // Radioelectronics and Commun. Syst. – 1992. – vol. 35. – No. 7. – P. 47-51. (SCOPUS).
30. Boldasov V.S. Mathematical model of a gas-discharge electron source having a secondary-emission cathode / V.S. Boldasov, A.I. Kuzmichev, D.S. Fillipychev // Radioelectronics and Commun. Syst. – 1990. – vol. 33. – No. 11. – P. 106-109.
31. Koryakovskii A.I. Peculiarities of gas-discharge current interrupter operation in a high-power modulator/ A.I. Koryakovskii, V.I. Krizhanovskii, A.I. Kuzmichev, V.A. Lapshin, A.I. Shendakov // Radioelectronics and Commun. Syst. – 1989. – vol. 32. – No. 11. – P. 16-20. (SCOPUS).
32. Andronova V.P. A high-power cold-cathode gas-discharge modulator tube / V.P. Andronova, A.M. Arsh, V.I. Krizhanovskii, A.I. Kuzmichev, A.I. Shendakov // Radioelectronics and Commun. Syst. – 1984. – vol. 27. – No. 1. – P. 90-91. (SCOPUS).
33. Kuzmichev A.I. Substrate Bias Voltage Generation for Pulse Ion Treatment with Electron Tubes in the Mode with Return of Electrons to the Grid / A.I. Kuzmichev // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. – Т. 49. – № 8. – С. 128-131.
34. Кузьмичёв А.И. Бестрансформаторное и импульсно-модулированное питание магнетронных распылителей от сети переменного тока / А.И. Кузьмичёв // Приборы и техника эксперимента. – 1997. – № 6. – С. 121-124. (SCOPUS).
35. Арш А.М. Газоразрядный прерыватель тока с магнитным управлением / А.М. Арш, В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичёв, В.А. Лапшин, В.М. Ртищев, А.И. Шендаков // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 3. – С. 116-118. (SCOPUS).
36. Андропова В.П. Мощный газоразрядный прерыватель тока с магнитным управлением / В.П. Андропова, А.М. Арш, В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичёв, А.И. Шендаков // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 3. – С. 235-236.
37. Kuzmichev A.I. Hybrid model of the thin-film deposition by cathode sputtering in a DC glow discharge / A.I. Kuzmichev // Journ. of Techn. Phys. (Poland). – 1999. – Vol. 40. – No. 1. – P. 233-236.

38. Biber V. Double EB evaporation system for self-ion enhanced PVD / V. Biber, A. Kuzmichev // *Elektrotechnika & Elektronika* (Bulgaria). – 2009. – Vol. 44. – No. 5-6. – P.118-122.
39. Кузьмичев А.И. Применение импульсных режимов при физическом осаждении покрытий в разрядах низкого давления и вакууме / А.И. Кузьмичев // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. – 1999. – Вып. 2(10). – С.29-39.
40. Кузьмичев А.И. Пакетно-импульсное питание индукционных ионизаторов пара в термоионных устройствах / А.И. Кузьмичев // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. – 1998. – Вып. 4(5)/5(6) – С.16-18.
41. Денбновецький С.В. Підвищення ефективності магнітного керування газовим розрядом в високовольтних комутуючих приладах низького тиску / С.В. Денбновецький, В.І. Крижанівський, А.І. Кузьмичев // *Електроніка і зв'язок*. – 2003. – № 20. С. 126-128.
42. Крижанівський В.І. Плазмові реактори для генерації озону на коронному розряді з вторинними емітерами електронів / В.І. Крижанівський, А.І. Кузьмичев, Р.Ю. Чаплинський // *Наукові вісті НТУУ “Київський політехнічний інститут”*. – 2010. – № 5 (73). – С. 5-9.
43. Кузьмичев А.И. Моделирование газоразрядных систем с движением частиц в режиме “сильного” поля / А.И. Кузьмичев // *Электроника и связь*. – 1997. – Вып. 3 (ч. 1). – С. 13-34.
44. Болдасов В.С. Физико-топологическая модель высоковольтного диода при низком давлении аргона / В.С. Болдасов, С.В. Денбновецький, А.И. Кузьмичев, Д.С. Филиппычев // *Автоматизация проектирования в электронике*. – 1990. – Вып. 41. – С. 90-97.
45. Болдасов В.С. Выбор аппроксимаций для физико-топологических моделей высоковольтных газоразрядных устройств низкого давления / В.С. Болдасов, С.В. Денбновецький, А.И. Кузьмичев // *Автоматизация проектирования в электронике*. – 1985. – Вып. 31. – С. 123-138.
46. Денбновецький С.В. Вопросы моделирования газоразрядных приборов / С.В. Денбновецький, А.И. Кузьмичев // *Автоматизация проектирования в электронике*. – 1983. – Вып. 27. – С. 119-129.
47. Вольпян О.Д. Азимутальная неоднородность толщины покрытия на волоконных и стержневых материалах при распылении плоских мишеней / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичев // *Наноинженерия*. – 2013. – № 12. – С. 39-42.
48. Вольпян О.Д. Градиентные оптические метаматериалы и вопросы технологии их изготовления / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичев, Ю.А. Обод // *Наноинженерия*. – 2012. – № 11(17). – С. 23-28.
49. Вольпян О.Д. Фотонные метаматериалы: технологические аспекты получения / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичев // *Наноинженерия*. – 2011. – № 2. – С. 6-15.
50. Вольпян О.Д. Магнетронное нанесение оптических покрытий при питании магнетронов переменным напряжением средней частоты / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичев // *Прикладная физика*. – 2008. – № 3. – С. 34-52.
51. Кузьмичев Д.А. Исследование особенностей зажигания разряда в гелии на левой ветви кривой Пашена / Д.А. Кузьмичев, В.С. Болдасов, А.И. Кузьмичев // *Прикладная физика*. – 1998. – № 1. – С. 15-24.
52. А. с. 1660070 СССР, МКИ H01J 17/40. Способ управления газоразрядным прерывателем тока / В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичев, В.А. Лапшин, А.И. Шендаков. Заявл. 27.12.88; опубл. 30.06.91, Бюл. № 24.
53. А. с. 1465990 СССР, МКИ H03K 17/52. Устройство для коммутации тока / В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичев, В.А. Лапшин, В.М. Ртищев, А.И. Шендаков. Заявл. 10.12.86; опубл. 15.03.89, Бюл. № 10.

54. А. с. 1261026 СССР, МКИ H01J 17/40. Способ управления газоразрядным коммутирующим прибором / И.М. Дрозд, В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичёв, В.А. Лапшин, В.М. Ртищев, А.И. Шендаков. Заявл. 12.04.85; опубл. 30.09.86, Бюл. № 36.
55. Патент 101342 України, МПК C23C 14/00. Пристрій для нанесення покриттів у вакуумі з іонно-плазмовою активацією / А.І. Кузьмичев, Л.Ю. Цибульский. Заявл. 20.02.2015; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 17.
56. Патент 101990 України, МПК H01J 37/073. Газорозрядне джерело електронів з вторинно-емісійним катодом / А.І. Кузьмичев, Л.Ю. Цибульский. Заявл. 12.10.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19.
57. Патент 35972 України, МПК C01B 13/11. Озонатор коронного розряду / С.В. Денбновецький, В.Д. Ціделко, В.І. Крижановський, А.І. Кузьмичев. Заявл. 25.05.1999; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3.
58. Patent 7509734 USA, Int. Cl. B23P 6/00. Repairing turbine element / R.L. Memmen, I.V. Belousov, A.I. Kuzmichev. Appl. filed 12.12.2003; publ. 31.03.2009.
59. Patent 8864956 USA, Int. Cl. C23C 14/00, B23P 6/00, H01J 37/32, F01D 5/00. Multi-component deposition / I.V. Belousov, A.I. Kuzmichev, V. Biber, R.L. Memmen. Appl. filed 20.10.2009; publ. 21.10.2014.
60. Patent 8642140 USA, Int. Cl. C23C 14/00. Ceramic Coating Deposition / I.V. Belousov, A.I. Kuzmichev, Yu.G. Kononenko, *et al.* Appl. filed 09.03.2011; publ. 04.02.2014.
61. Patent 9464350 USA, Int. Cl. C23C 14/54; G01K 1/02. Deposition substrate temperature and monitoring / R.S. Mullin, A. Kuzmichev, I.V. Belousov, Yu.G. Kononenko, O.G. Pankov, D. Ryzhikov. Appl. filed 17.03.2014; publ. 11.10.2016.
62. Kuzmichev A.I. Pulse Plasma Ion Assisted EB-PVD with doping by ion sputtering of additional target / A. Kuzmichev // 13<sup>th</sup> Int. Conf.– PSE, 10-14 Sept. 2012, Garmisch-Partenkirchen: Abstr. – PO1054, 1 p.
63. Volpian O. Thin film dielectric gradient optical structures for space photonics / O. Volpian, A. Kuzmichev, G. Ermakov, *et al.* // Progress in electromagnetics research symposium – PIERS, 6-9 July 2015, Prague, Czech Rep.: Proc. – P. 1498-1501 (SCOPUS).
64. Volpian O.D. Technological aspects of obtaining gradient optical metamaterial / O.D. Volpian, A. I. Kuzmichev, and Yu. A. Obod // PIERS, 19-23 Aug. 2012, Moscow: Proc. – P. 277-281 (SCOPUS).
65. Kuzmichev A.I. Plasma generation in pulsed inductive discharge for deposition of thin films with self-ion bombardment / A.I. Kuzmichev // Int. Cong. Plasma Phys. – 1998 ICPP& 25-th EPS CCFPP, 29.06-03.07.1998, Prague: Europhys. Conf. Abst. – V. 22C, 1998, p. 2757-2760.
66. Kuzmichev A.I. Characteristics of superdense glow discharge with hollow cathode in magnetic field / A.I. Kuzmichev, V.I. Kryzhanovskij // 24<sup>th</sup> ICPIG, 11-16 July 1999, Warsaw: Proc. – Vol. 3, p. 23-24.
67. Kuzmichev D.A. Ionization by high-energy atoms reflected from cathode in high-voltage low-pressure discharges / D.A. Kuzmichev, V.S. Boldasov, A.I. Kuzmichev, D.S. Fillipychev // 24<sup>th</sup> ICPIG, 11-16 July 1999, Warsaw: Proc. – Vol. 3, p. 53-54.
68. Kuzmichev A.I. A possible mechanism of secondary electron emission augmentation in the hollow cathode discharge due to bombardment of the cathode surface by reflected atoms / A. Kuzmichev // 17<sup>th</sup> ESCAMPIG, 1-5 Sept. 2004, Romania, Constanta: Abstr. P. 135-136.
69. Kuzmichev A.I. Simulation of the sputtered atom transport in a pulse deposition process / A.I. Kuzmichev, I.M. Goncharuk // 20<sup>th</sup> Int Symp. on Disch. and Electrical Insul. in Vacuum – ISDEIV, 1-5 Jule 2002, Tours, France: Proc. – P. 303-306. (SCOPUS).

70. Bazhenov V.Yu. Investigation of the steralization of medical instruments by atmospheric pressure discharges / V.Yu. Bazhenov, A.I. Kuzmichev, V.I. Kryzhanovsky *et al.* // 15<sup>th</sup> Int. Symp. on Plasma Chemistry – ISPC, 9-13 July 2001, Orleans, France: Proc. – V. 7, p. 3005-3010.
71. Kuzmichev A.I. Mathematical model of pulse gas-discharge secondary-emission high-energy electron source with the anode plasma / A. Kuzmichev // 32<sup>nd</sup> Int. Sci. Conf. Electronics and Nanotechnology – ELNANO, 10-12 Apr. 2012, Kiev: Proc. – P. 42-43.
72. Volpian O.D. Magnetron discharge sputtering for fabrication of nanogradient optical coatings / O.D. Volpian, A.I. Kuzmichev, G.F. Ermakov, A.I. Krikunov, Yu.A. Obod, N.V. Silin, S.V. Shkatula // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 652. – P. 012009 (1-6). DOI:10.1088/1742-6596/652/1/012009 (SCOPUS).
73. Kuzmichev A. Characteristics of flows of energetic atoms reflected from metal targets during ion bombardment / A. Kuzmichev, V. Perevertaylo, L. Tsybulsky, O. Volpian // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 729. – P. 012005 (1-5). DOI:10.1088/1742-6596/729/1/012005 (SCOPUS).
74. Болдасов В.С. Математическое моделирование электронной пушки с несамостоятельным высоковольтным разрядом в гелии / В.С. Болдасов, С.С. Денисов, А.И. Кузьмичев, В.П. Федяков, Д.С. Филлипычев, А.Ю. Шабаров. – Препринт НИИЭФА Л-0855. – Москва: ЦНИИАтоминформ, 1990. – 15 с.
75. Кузьмичёв А.И. Переходные процессы в цепях питания импульсных распылительных систем / А.И. Кузьмичёв // Тр. Украинского вакуумного об-ва. – 1995. – Т. 1. – С. 112-116.
76. Белевский В.П. Методы термоионного осаждения для нанесения металлических покрытий / В.П. Белевский, А.И. Кузьмичев. – Киев: Об-во “Знание” Украины, 1984. – 22 с.
77. Белевский В.П. Импульсная ионная обработка и осаждение тонких пленок и покрытий / В.П. Белевский, А.И. Кузьмичев, Э.Ф. Массалитин. – Киев: Об-во “Знание” Украины, 1991. – 23 с.

### Анотації

**Кузьмичев А.І. Газорозрядні системи з вторинними емітерами для електронної апаратури. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.02 – вакуумна, плазмова та квантова електроніка. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, 2018.

В дисертації розв’язано науково-прикладну проблему розробки наукових і технічних основ побудови і практичного використання газорозрядних систем на основі вторинних емітерів частинок для комутуючої, технологічної та біомедичної апаратури з поліпшеними показниками.

Удосконалено теоретичну модель газорозрядних систем на основі вторинних емітерів для режиму сильного поля при низьких тисках завдяки урахуванню додатково до іонізації газу катодними електронами і частинками, утвореними в міжелектродному проміжку, іонізації частинками, відбитими як від позитивного, так і негативного електродів, що покращило аналізування і моделювання фізичного механізму газового розряду з вторинними емітерами і забезпечило більш повне узгодження теорії з експериментом.

На базі системи з вторинно-емісійним катодом, що використовує надщільний тліючий розряд магнетронного типу, розроблено і реалізовано високовольтний комутатор-переривник струму з холодним катодом,

Створені та досліджені на базі газорозрядних систем з твердотільними і плазовими вторинними емітерами імпульсні магнетронні і термоіонні пристрої для осадження покриттів і тонких плівок, що дозволило реалізувати нові перспективні технології конструювання поверхневих структур для мікроелектроніки, оптики і машинобудування.

На базі безстримерного мульти-коронного розряду атмосферного тиску з вторинно-емісійним катодом розроблено і реалізовано озонову біомедичну апаратуру, що забезпечило проведення клінічних досліджень і успішні застосування озонотерапевтичних процедур, а також успішні біологічні експерименти із застосуванням озону.

**Ключові слова:** тліючий розряд, дуговий розряд, магнетронний розряд, імпульсний розряд, безстримерний коронний розряд, газорозрядна система, вторинний емітер, плазовий емітер, імпульсний модулятор, магнетронне розпилення, термоіонне осадження, озонотерапія, бактерицидний ефект.

**Кузьмичёв А.И. Газоразрядные системы с вторичными эмиттерами для электронной аппаратуры. – Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная, плазменная и квантовая электроника. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, 2018.

В диссертации решена научно-прикладная проблема разработки научных и технических основ построения и практического использования газоразрядных систем на основе вторичных эмиттеров частиц для коммутирующей, технологической и биомедицинской аппаратуры с улучшенными показателями.

Усовершенствована теоретическая модель газоразрядных систем на основе вторичных эмиттеров для режима сильного поля при низких давлениях благодаря учету дополнительно к ионизации газа катодными электронами и частицами, образовавшимися в межэлектродном промежутке, ионизации частицами, отражёнными как от положительного, так и отрицательного электродов, что улучшило анализ и моделирование физического механизма газового разряда с вторичными эмиттерами и обеспечило более полное согласование теории с экспериментом.

На базе системы с вторично-эмиссионным катодом, которая использует сверхплотный тлеющий разряд магнетронного типа, разработан и реализован высоковольтний коммутатор-прерыватель тока с холодным катодом.

Созданы и исследованы на базе газоразрядных систем с твердотельными и плазменными вторичными эмиттерами импульсные термоионные и магнетронные устройства для осаждения покрытий и тонких пленок. Это позволило реализовать новые перспективные технологии конструирования поверхностных структур для микроэлектроники, оптики и машиностроения.



На базе бесстримерного мульти-коронного разряда атмосферного давления с вторично-эмиссионным катодом разработана и реализована озоновая биомедицинская аппаратура. Это обеспечило проведение клинических исследований и успешные применения озонотерапевтических процедур, а также успешные биологические эксперименты с применением озона.

**Ключевые слова:** тлеющий разряд, дуговой разряд, магнетронный разряд, импульсный разряд, бесстримерный коронный разряд, газоразрядная система, вторичный эмиттер, плазменный эмиттер, импульсный модулятор, магнетронное распыление, термоионное осаждение, озонотерапия, бактерицидный эффект.

**Kuzmichev A.I. Gas-discharge systems with secondary emitters for electronic apparatus. – Manuscript.**

Doctoral thesis of technical sciences on specialty 05.27.02 – vacuum, plasma and quantum electronics. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to the scientific and applied problem of development of scientific and technical basics of construction and practical use of gas-discharge systems on the basis of secondary emitters of particles for switching, technological and biomedical apparatus with improved characteristics.

The theoretical model of gas discharge systems based on secondary emitters for the strong field mode at low pressures has been improved due to the consideration, in addition to gas ionization by cathode electrons and particles formed in the inter-electrode gap, ionization of particles reflected from both positive and negative electrodes, which improved the analysis and modeling of the physical mechanism of gas discharge with secondary emitters and ensured the agreement of the theory with experiment.

On the basis of the system with a secondary emission cathode, using the super-dense glow discharge of magnetron type, a high-voltage opening switch-breaker of current with a cold cathode has been developed and implemented.

Pulsed thermionic and magnetron apparatus for deposition of coatings and thin films based on gas-discharge systems with solid state and plasma secondary emitters have been created and investigated, which allowed to realize new promising technologies of constructing surface structures for microelectronics, optics and machine building.

On the basis of the streamerless multi-corona atmospheric pressure discharge with the secondary emission cathode, ozone biomedical equipment was developed and implemented, which provided clinical research and successful application of ozone-therapeutic procedures, as well as successful biological experiments with the use of ozone.

**Key words:** glow discharge, arc discharge, magnetron discharge, pulse discharge, streamerless corona discharge, gas discharge system, secondary emitter, plasma emitter, pulse modulator, magnetron sputtering, thermionic deposition, ozone-therapy, bactericidal effect.